

## **MEMS-2: Čebyševov filter typu 1 — pásmový prieplust**

REFERÁT V RÁMCI PREDMETU  
MODELOVANIE A SIMULÁCIE V ELEKTROTECHNIKE  
LS 2022/23, 3. roč. Bc. AES

**Yevgenii Chernozub, III. roč. Bc, APÉ**

Odovzdané dňa:	Bodov spolu:	Poznámka:
Hodnotenie: – správy (max. 18b.)		
– riešenia (max. 14 b.)		
– prezentácie a prednesu (max. 8 b.)		

Komentáre pri jednotlivých dátumoch kontroly správy:

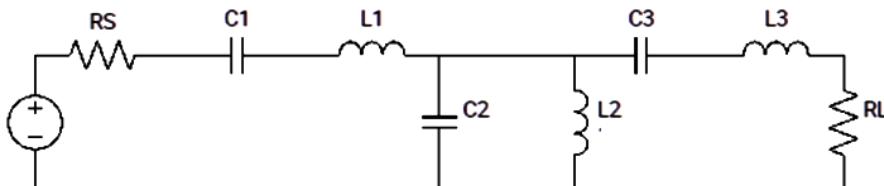
**Dátum:** ...  
• ...  
• ...

## Zadanie

Riešitelia: Chernozub Yevgenij

yevgenii.chernozub@student.tuke.sk;

Zadanie: Riešte zapojenie filtračného článku podľa obrázka:



Pre vyšetrovanie zvoľte vhodné parametre obvodu, pri ktorých sa začínajú prejavovať jeho frekvenčné vlastnosti. Prekreslite tento obvod s použitím značiek podľa normy.

Správa musí obsahovať nasledovné výstupy:

- 1) Úvod (príp. pohľadajte na internete riešenia podobného obvodu stručne ich komentujte).
- 2) Zostavenie rovníc obvodu a z nich odpovedajúcu maticovú rovnicu s impedanciami obvodu: (1) metódou slučkových prúdov (MSP) a (2) metódou uzlových napäti (MUN).
- 3) Nájdenie TF aplikáciou MSP a MNU v symbolickom MATLABe. Uveďte ju: (1) v symbolickom tvare a (2) v numerickom tvare pre zvolené hodnoty parametrov ( $a_0 = 1$ ).
- 4) Pre získanú TF nakresliť PrCh a odpovedajúce LFCh. Popíšte ich priebeh a uveďte, o aký obvod ide. V tabuľke pod grafom uveďte hodnoty núl a pólov pre základné hodnoty parametrov.
- 5) Vyšetrenie závislosti zmien vlastností obvodu (PrCh a LFCh) pri zmene zvoleného parametra ( $L, C$ ) – cca 2 až 5x väčšia a menšia hodnota, pričom ostatné parametre obvodu sa nemenia. Podobne zmeňte jeden ďalší parameter a slovne analyzujte, či výsledok zodpovedá predpokladom a prečo.
- 6) Odozvy obvodu na harmonický signál pri cca troch rôznych frekvenciach zvolených tak, aby vystihovali frekvenčné vlastnosti obvodu (kde sa prejavuje výrazná zmena fázy, príp. zmena amplitúdy LFCh). Zobrazte iba niekoľko amplitúd (max. 4).
- 7) Odvodenie stavového modelu obvodu.  
Overte správnosť riešenia s výsledkami získanými v bode 3 (musia byť rovnaké).
- 8) Odvodenie simulačného modelu z rovníc obvodu (nie z TF!) a simulácia obvodu v Simulinku pri základných hodnotách parametrov (výstup v MATLABe pomocou bloku To Workspace). Porovnajte s výsledkami získanými v bode 3 (musia byť rovnaké).
- 9) Ten istý experiment urobte pri napájaní obdlžnikovým napäťom s rovnakými frekvenciami.
- 10) Odozvu obvodu v Simulinku na harmonický signál s narastajúcou frekvenciou (chirp) vo zvolenom rozsahu, aby vystihoval vlastnosti LFCh.
- 11) Simuláciu obvodu pomocou programu Simscape.
- 12) Zostavenie GUI v MATLABe umožňujúceho pohodlnú a rýchlu analýzu obvodu.
- 13) V závere dôsledne analyzujte dosiahnuté výsledky (o aký obvod ide, aké boli použité metódy riešenia, aké sú dosiahnuté výsledky, aký majú vplyv jednotlivé parametrov na zmenu vlastností a pod.).

## Obsah

Zadanie .....	2
Obsah.....	3
Zoznam symbolov a skratiek.....	4
Zoznam použitých obrázkov .....	5
Zoznam použitých tabuliek .....	6
1    Úvod .....	7
1.1    Návrh Čebyševovho pásmového filtra .....	8
2    Matematický model .....	10
2.1    Operátorové impedancie súčiastok R, L, C .....	10
2.2    Metóda slučkového prúdu .....	12
2.3    Metóda uzlového napäťa .....	16
3    Zmena parametrov dynamického systému .....	22
4    Model v Simulinku .....	26
5    Odvodenie stavového modelu systému .....	30
5.1    Stavový popis systému .....	30
5.2    Zostavenie stavového modelu elektrického systému .....	30
5.3    Zostavenie priebehov LFCh a PrCh stavového modelu s pomocou MATLABu a Simulinku .....	32
6    Odozva systému na harmonický budiaci signál .....	35
6.1    Analýza LFCh .....	35
6.2    Odozvy .....	36
6.3    Odozva na obdlžníkový signál .....	38
7    Odozva obvodu na harmonický signál s narastajúcou frekvenciou (chirp).....	41
8    Model v Simscape .....	43
9    Grafický používateľský interfejs (GUI).....	45
Záver.....	47
Zoznam použitej literatúry .....	48
Prílohy .....	49

## Zoznam symbolov a skratiek

### Symboly

$A$	matica systému (v stavovom popise)
$b, B$	vstupný vektor, vstupná matica
$ct, C$	výstupný vektor (transponovaný), výstupná matica
$C$	kapacita
$f(t), F(s)$	sila - časová funkcia, operátorový obraz, funkcia [N]
$F(s)$	prenosová funkcia
$G(s)$	prenosová funkcia
$i(t), I(s)$	prúd - časová funkcia [A] operátorový obraz
$L$	Lagrangeova funkcia, indukčnosť [H]
$m$	hmotnosť, rád čitateľa prenosovej funkcie [kg]
$q$	náboj, zovšeobecnená súradnica [C]
$s$	Laplaceov operátor
$t$	čas [s]
$T$	časová konštantá, kinetická energia
$\Delta$	
$u(t), U(s)$	napätie - časová funkcia,, operátorový obraz [V]
$x(t), X(s)$	stavová veličina – časová funkcia, operátorový obraz
$Z(s)$	impedancia, operátorový obraz [Ohm]
$y(t), Y(s)$	výstupná veličina

### Grécke písmená

$\varphi$	uhol [ $^\circ$ ]
$\omega(t), \omega(s)$	uhlová rýchlosť [ras/s]

### Horné indexy

$T$	transponovaný
-----	---------------

### Skratky

GUI	(Graphical User Interface) – grafický používateľský interfejs
PrCh	Prechodomá charakteristika
LFCh	Logaritmická frekvenčná charakteristika
KZ	Kirchhoffov zákon
BW	(Bandwidth) šírka pásma

## Zoznam použitých obrázkov

Obr. 1.1 Čebyševov filter charakteristika.....	7
Obr. 2.1 Elektrický obvod filtra .....	11
Obr. 2.2 Elektrický obvod filtra so zjednodušenou impedanciou $Ze$ .....	12
Obr. 2.3 Popis slučkových prúdov .....	13
Obr. 2.4 Popis slučkových prúdov vo forme operátorov Laplace.....	13
Obr. 2.5 Popis prúdov v uzle A .....	17
Obr. 2.6 Popis prúdov v uzle A vo forme operátorov Laplace .....	17
Obr. 2.7 Elektrický obvod so zjednodušenými impedanciami.....	18
Obr. 2.8 Prechodová logaritmicko frekvenčná charakteristiky.....	20
Obr. 2.9 Vlastnosti LFCh .....	21
Obr. 3.1.1 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov $L1$ a $L3$ .....	22
Obr. 3.2 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra $L2$ .....	23
Obr. 3.3 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov $L1$ , $L2$ a $L3$ .....	23
Obr. 3.4 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov $C1$ , $C2$ a $C3$ .....	24
Obr. 3.5 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra $Rout$ .....	24
Obr. 3.6 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra $Rin$ .....	25
Obr. 4.1 Elektrický obvod filtra .....	26
Obr. 4.2 Simulačna schéma paralelnej LC impedancie $Ze$ .....	27
Obr. 4.3 Simulačna schéma pre prvú slučku .....	27
Obr. 4.4 Simulačna schéma pre prvú slučku .....	28
Obr. 4.5 Simulačna schéma pre uzol A .....	28
Obr. 4.6 Finálna simulačna schéma v Simulink .....	28
Obr. 4.7 PrCh zo schémy v Simulink .....	29
Obr. 5.1 Elektrický obvod filtra s popisom stavových velečín .....	30
Obr. 5.2 PrCh a LFCh odvodene zo stavového popisu .....	34
Obr. 6.1 LFCh sýstemu zosilnenoho o hodnotu 2.85.....	35

Obr. 6.2 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$ .....	36
Obr. 6.3 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$ .....	36
Obr. 6.4 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$ .....	36
Obr. 6.5 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$ .....	37
Obr. 6.6 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$ .....	37
Obr. 6.7 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$ .....	37
Obr. 6.8 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.51e7 \text{ rad/s}$ .....	38
Obr. 6.9 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$ .....	38
Obr. 6.10 Odozva na obdlžnikový signál $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$ .....	39
Obr. 6.11 Odozva na obdlžnikový signál $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$ .....	39
Obr. 6.12 Odozva na obdlžnikový signál $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$ .....	39
Obr. 6.13 Odozva na obdlžnikový signál $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$ .....	40
Obr. 7.1 Schéma v Simulink pre odozvu na <i>Chirp</i> signál .....	41
Obr. 7.2 Nastavenie v bloku Chirp Signal .....	41
Obr. 7.3 Odozva na Chirp Signál .....	42
Obr. 8.1 Elektrický obvod systému v Simscape .....	43
Obr. 8.2 PrCh z modelu v Simscape .....	44

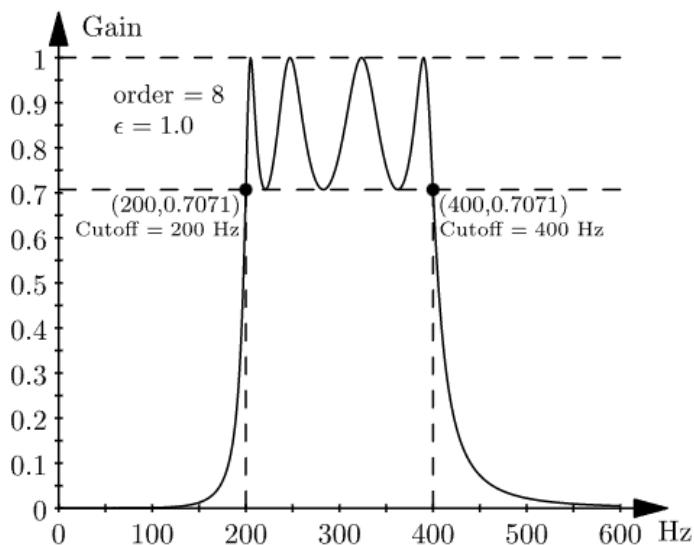
## Zoznam použitých tabuľiek

Tab. 1 Nuly a poly prenosu .....	16
----------------------------------	----

## 1 Úvod

Elektrický systém, ktorý budeme v tejto práci skúmať a modelovať, je reprezentáciou Čebyševovho filtra. Na začiatok zvážime, aký druh filtra je a aký je jeho princíp fungovania.

Čebyševov filter je typ elektronického filtra, ktorý je navrhnutý tak, aby mal ostrý prechod medzi priepustným pásmom (kam môže signál prechádzať) a stop pásmom (kde je signál zoslabený alebo blokovaný). Je pomenovaný po ruskom matematikovi Pafnuty Chebyshev, ktorý ako prvý opísal matematické princípy, ktoré stoja za návrhom tohto typu filtra.



Obr. 1.1 Čebyševov filter charakteristika

Čebyševov filter dosahuje svoje ostré obmedzenie tým, že umožňuje zvlnenie v priepustnom pásme, čo znamená, že odozva filtra sa odchyluje od ideálnej odozvy, aby sa dosiahol strmší prechod. Tento kompromis medzi strmosťou medznej hodnoty a veľkosťou zvlnenia v priepustnom pásme je riadený parametrom známym ako „poradie“ filtra.

Čebyševove filtre sa bežne používajú v rôznych aplikáciách, vrátane spracovania zvuku a videa, telekomunikácií a riadiacich systémov, kde sa vyžaduje ostrý prechod medzi priepustným a stop pásmom. Sú užitočné najmä v situáciach, keď signál obsahuje vysoké aj nízke frekvencie, pretože dokážu tieto frekvencie efektívne oddeliť a zároveň minimalizovať skreslenie a stratu signálu.

Návrh Čebyševovho filtra zahŕňa výber vhodného poradia filtra, veľkosti zvlnenia a medznej frekvencie, aby spĺňali požadované špecifikácie filtra. Tu sú všeobecné kroky pri navrhovaní Čebyševovho filtra:

- Určenie typu a poradia filtra: Rozhodnite sa pre typ Čebyševovho filtra (dolnopriepustný, hornopriepustný, pásmový alebo pásmový) a poradie filtra (zvyčajne určené podľa požadovaného útlmu a medznej frekvencie).

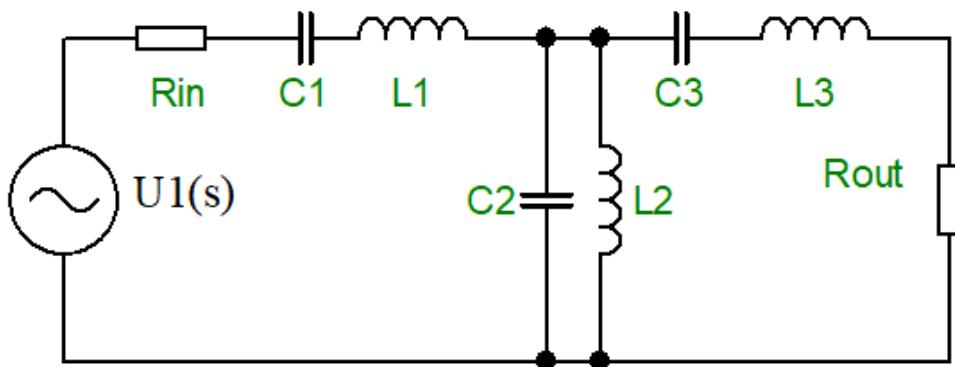
- Vypočítajte veľkosť zvlnenia: Veľkosť zvlnenia v prieplustnom pásmi je riadená veľkosťou zvlnenia. Vypočítajte veľkosť zvlnenia na základe požadovaných charakteristik prieplustného pásma, ako je útlm prieplustného pásma a útlm neprieplustného pásma.
- Vypočítajte medznú frekvenciu: Určite medznú frekvenciu na základe požadovanej frekvenčnej odozvy filtra. Medzná frekvencia je frekvencia, pri ktorej odozva filtra prechádza z prieplustného pásma do neprieplustného pásma.
- Výpočet koeficientov filtra: Na výpočet koeficientov filtra, ktoré definujú prenosovú funkciu filtra, použite Chebyshevove rovnice návrhu filtra.

Implementujte filter: Implementujte filter pomocou vypočítaných koeficientov a komponentov obvodu, ako sú odpory, kondenzátory a tlmivky.

## 1.1 Návrh Čebyševovho pásmového filtra

V budúcnosti sa budeme musieť zaoberať výberom parametrov pre náš elektrický obvod. Na internetových zdrojoch sme našli video[1], ktoré navrhovalo spôsob výpočtu parametrov nášho filtra.

Metóda spočíva v tom, že časti obvodu, kde sú cievka a kondenzátor zapojené do párov v sérii alebo paralelne, sú nahradené hodnotou  $g$ .



Ďalej vypočítame hodnotu každého prvku pomocou nasledujúcich vzorcov:

Na zapojenie komponentov do série:

$$L_i = \frac{g_i R_0}{\omega_0 \Delta} \quad (2.1)$$

$$C_i = \frac{\Delta}{\omega_0 g_i R_0} \quad (2.2)$$

Pre paralelné zapojenie komponentov:

$$L_i = \frac{R_0 \Delta}{g_i \omega_0} \quad (2.1)$$

$$C_i = \frac{g_i}{\omega_0 \Delta R_0} \quad (2.2)$$

kde:

$R_0$  - impedancia cievky;

$\omega_0$  - frekvencia kmitania, ktorá je vyjadrená pomocou tzv. frekvencie stredu, ktorú potrebujeme;

$\Delta$  - šírka pásma

Výhodou tejto techniky je, že hodnoty  $g$  sú už vypočítané (Tab. 1.1), takže pomocou hotových tabuľiek môžeme vypočítať hodnoty komponentov pre Chebyshev filter s rôznymi charakteristikami. V tomto prípade sme sa rozhodli použiť dátá na filter zvlnením 3dB[2].

Order ripple	N=3		
	0,2 dB	1,0 dB	3,0 dB
$g_1$	1.22754	2.02359	3.34874
$g_2$	1.15254	0.99410	0.71170
$g_3$	1.22754	2.02359	3.34874

Tab. 1.1 Tabuľka hodnôt g

V tejto časti sme vysvetlili, ako sme v našej práci získali realne hodnoty komponentov pomocou tejto techniky.

## 2 Matematický model

Modelovanie elektrických systémov zahŕňa vytváranie matematických reprezentácií elektrických obvodov alebo systémov na analýzu ich správania a predpovedanie ich výkonu v rôznych podmienkach. Ako už bolo uvedené, náš elektrický systém je reprezentáciou Čebyševovho filtra. V nasledujúcich kapitolách budeme rôznymi spôsobmi modelovať procesy prebiehajúce v systéme.

Táto kapitola sa bude zaoberať nasledujúcimi bodmi:

- 1) Identifikujte komponenty systému: Identifikujte komponenty, ktoré tvoria elektrický systém, ako sú odpory, kondenzátory, induktory a zdroje napäťia a prúdu.
- 2) Definujte rovnice systému: Napíšte rovnice, ktoré popisujú správanie každej zložky v systéme na základe ich elektrických vlastností a fyzikálnych zákonov, ktorými sa riadi ich činnosť. Napríklad Ohmov zákon možno použiť na opis správania rezistora, zatiaľ čo vzťah medzi napäťím a prúdom pre kondenzátor možno opísť pomocou Kirchhoffovho zákona.
- 3) Zostavte model systému: Použite rovnice komponentov na zostavenie matematického modelu elektrického systému, čo môže zahŕňať vytvorenie schémy zapojenia alebo blokovej schémy systému.
- 4) Simulácia modelu systému: Pomocou simulačného softvéru spustite simulácie modelu systému a analyzujte správanie systému v rôznych podmienkach, ako sú zmeny hodnôt komponentov, vstupných signálov alebo faktorov prostredia.

### 2.1 Operátorové impedancie súčiastok R, L, C

Štruktúra systému obsahuje pasívne elektrické prvky rezistor, cievka a kondenzátor, preto zväžime základné vzorce pre procesy prebiehajúce vo vnútri týchto prvkov. Tieto vzorce sú základné a vyjadrujú vzťah medzi prúdom a napäťím v každom prvku[3].

Pre rezistor:

$$u_R(t) = Ri(t) \quad (2.1)$$

$$i(t) = \frac{1}{R}u_R(t) \quad (2.2)$$

Po Laplaceovej transformácii budú mať tvar:

$$U_R(s) = RI(s) \quad (2.5)$$

$$I(s) = \frac{1}{R}U_R(s) \quad (2.6)$$

$$Z_R(s) = R \quad (2.7)$$

Pre Kondenzátor:

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Po Laplaceovej transformácii rovnice budú mať tvar:

$$U_C(s) = \frac{1}{Cs} I(s) \quad (2.5)$$

$$I(s) = Cs U_C(s) \quad (2.6)$$

$$Z_R(s) = \frac{1}{Cs} \quad (2.7)$$

Pre cievku:

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Po Laplaceovej transformácii rovnice budú mať tvar:

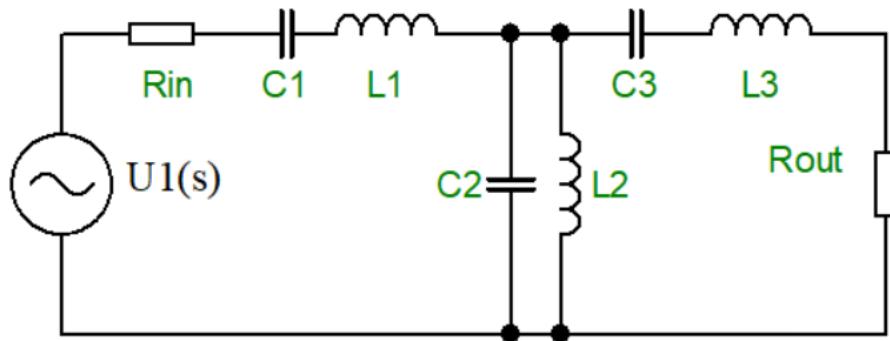
$$U_L(s) = Ls I(s) \quad (2.5)$$

$$I(s) = \frac{1}{sL} U_L(s) \quad (2.6)$$

$$Z_R(s) = Ls \quad (2.7)$$

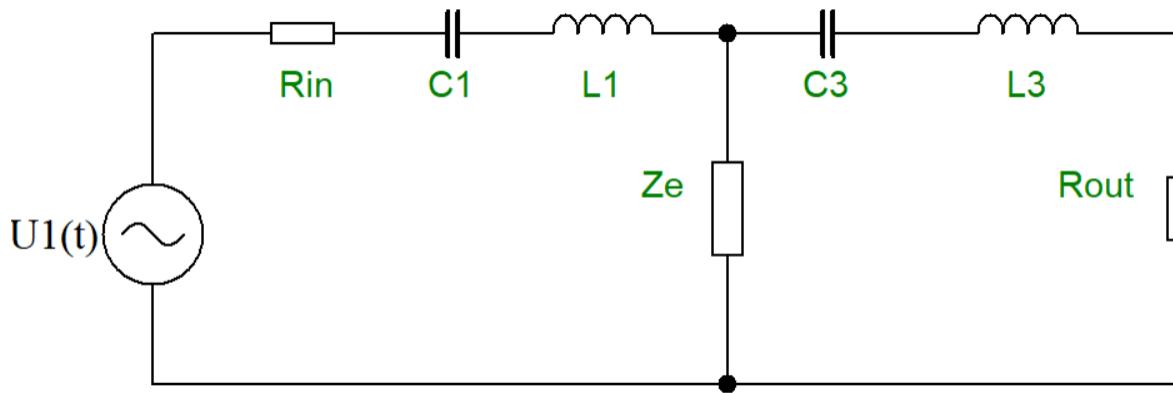
Na základe vyššie uvedených vzorcov môžeme pristúpiť k zostavovaniu diferenciálnych rovnic sústavy, aby sme potom našli funkciu prenosu. Na zostavenie diferenciálnych rovnic potrebujeme nájsť všetky prúdy a napäcia na prvkoch systému. Existuje mnoho spôsobov, ako tento problém vyriešiť, ale my použijeme iba dva: Metóda slučkových prúdoov a Metóda uzlových napätií. Pri správnom riešení budú prenosové funkcie oboch spôsobov riešenia rovnaké.

Pôvodná schéma vyzerala takto:



Obr. 2.1 Elektrický obvod filtra

V prvom rade sme túto schému zjednodušili. Induktor a kondenzátor  $C_2$  a  $L_2$  sú v tomto prípade zapojené paralelne, takže tieto dva komponenty môžeme nahradíť jednou ekvivalentnou impedaciou  $Z_e$ :



Obr. 2.2 Elektrický obvod filtra so zjednodušenou impedanciou  $Z_e$

V tomto prípade sa ekvivalentná impedacia zistí podľa pravidla paralelného zapojenia impedancií:

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_L} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{sL_2} + \frac{1}{sC_2} \quad (2.6)$$

Po úprave dostaneme:

$$Z_e = \frac{sL_2}{1 + s^2 L_2 C_2} \quad (2.7)$$

## 2.2 Metóda slučkového prúdu

Metóda slučkového prúdu (MSP) je technika používaná na analýzu elektrických obvodov, najmä tých s viacerými slučkami alebo cestami pre tok prúdu. Táto metóda zahŕňa predpokladanie prúdov cez slučky v obvode a následné použitie Kirchhoffových zákonov na vytvorenie systému rovníc, ktoré možno vyriešiť na určenie skutočných prúdov pretekajúcich každou vetvou obvodu.

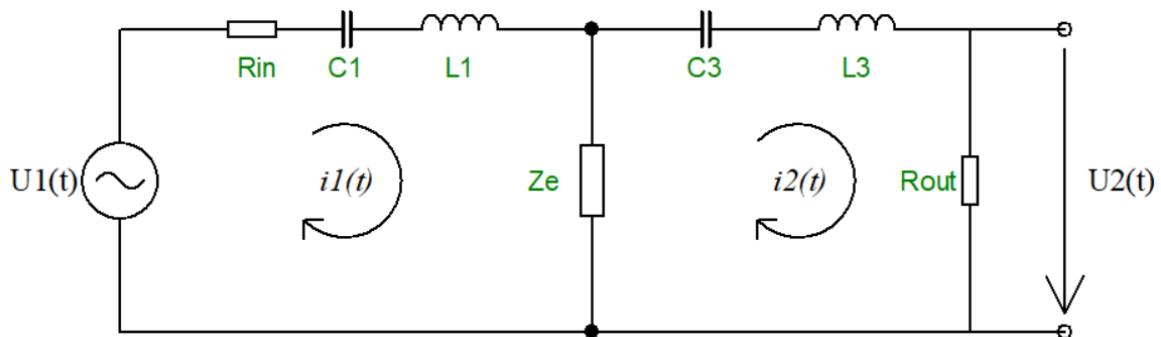
Tu sú všeobecné kroky pri použití metódy slučkového prúdu na analýzu obvodu[7]:

- 1) Identifikujte slučky: Hľadajte akékoľvek slučky alebo uzavreté cesty v obvode. Toto budú slučky, ktoré budete musieť analyzovať pomocou metódy slučkových prúdov.
- 2) Priradte prúdy slučky: Predpokladajme smer a veľkosť prúdu pretekajúceho každou slučkou. Priradte každému prúdu slučky názov premennej, napríklad  $I_1, I_2$  atď.

- 3) Napíšte rovnice slučky: Pomocou Kirchhoffovho zákona o napäti (KVL) napíšte rovnicu pre súčet poklesov v každej slučke. Táto rovница bude zahŕňať prúdy slučky a impedancie a zdroje napäcia v slučke.
- 4) Vyriešte systém rovnic: Teraz by ste mali mať systém rovnic, ktoré je možné vyriešiť pre slučkové prúdy. Tieto slučkové prúdy sa potom môžu použiť na výpočet prúdu cez každú vetvu obvodu.

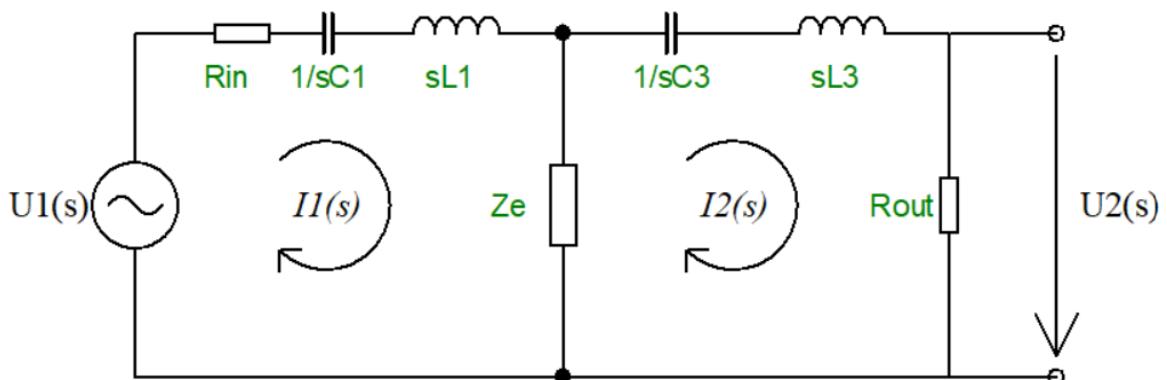
Metóda slučkového prúdu je obzvlášť užitočná na analýzu zložitých obvodov s viacerými slučkami, pretože umožňuje rozdeliť obvod na menšie, lepšie zvládnuteľné časti. Môže sa použiť aj v kombinácii s inými technikami, ako je napríklad analýza uzlov, aby sa získalo úplnejšie pochopenie správania obvodu.

Priebeh riešenia: Najprv si zvolíme smery prúdov vo vetvách



Obr. 2.3 Popis slučkových prúdov

Táto schéma je uvedená nižšie vo forme operátorov Laplace:



Obr. 2.4 Popis slučkových prúdov vo forme operátorov Laplace

Ďalej pomocou druhého Kirchhoffovho zákona napíšeme diferenciálne rovnice pre slučku 1 a pre slučku 2 v Laplaceovom tvare[5]:

$$U_1(s) = \left( Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 \right) I_1(s) - Z_e I_2(s) \quad (2.8)$$

$$0 = -Z_e I_1(s) - \left( Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \right) I_2(s) \quad (2.9)$$

V týchto dvoch rovniacach sú neznáme prúdy  $I_1(s)$  a  $I_2(s)$ .

Maticový zápis týchto rovníc je nasledovný:

$$\begin{bmatrix} Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 & -Z_e \\ -Z_e & Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Ďalej vypočítame prúd  $I_2(s)$  pomocou Cramerovho pravidla:

$$I_2(s) = \frac{\det \begin{bmatrix} Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 & U_1(s) \\ -Z_e & 0 \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 & -Z_e \\ -Z_e & Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \end{bmatrix}} \quad (2.13)$$

$$I_2(s) = \frac{Z_e U_1(s)}{\det Z} \quad (2.13)$$

$$\det Z = \left( Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 \right) \left( Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \right) - (Z_e)^2 \quad (2.13)$$

Ked' poznáme veľkosť prúdu  $I_2(s)$ , môžeme nájsť veľkosť napäcia  $U_2(s)$  podľa Ohmovho zákona:

$$U_2(s) = R_{out} I_2(s) \quad (2.15)$$

Použijeme MATLAB a dosadíme vybrané nami hodnoty veličín na výpočty aj na vyjadrenia prenosovej funkcií

$$F(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} \quad (2.16)$$

Výpis z programu:

```

MSP
Z =
[Rin + L1*s + 1/(C1*s) + (L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1),
 (L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1)]
[ -(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), Rout + L3*s + 1/(C3*s) +
 (L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1)]
u =
1
0
ZI2 =
[Rin + L1*s + 1/(C1*s) + (L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), 1]
[ -(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), 0]
I2 =
(C1*C3*L2*s^3)/(C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 +
 C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 + C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 +
 C1*C3*L2*L3*s^4 + C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 +
 C2*C3*L2*Rout*s^3 + C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 +
 C1*C3*Rout*Rin*s^2 + C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 +
 C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1)
Ur =

```

```

(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 +
C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 + C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 +
C1*C3*L2*L3*s^4 + C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 +
C2*C3*L2*Rout*s^3 + C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 +
C1*C3*Rout*Rin*s^2 + C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1)
F =
(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 +
C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 + C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 +
C1*C3*L2*L3*s^4 + C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 +
C2*C3*L2*Rout*s^3 + C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 +
C1*C3*Rout*Rin*s^2 + C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1)
F =
(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + (C1*C2*C3*L1*L2*Rout +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin)*s^5 + (C1*C2*L1*L2 + C1*C3*L1*L2 + C1*C3*L1*L3 + C1*C3*L2*L3 +
C2*C3*L2*L3 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin)*s^4 + (C1*C3*L1*Rout + C1*C3*L2*Rout +
C2*C3*L2*Rout + C1*C2*L2*Rin + C1*C3*L2*Rin + C1*C3*L3*Rin)*s^3 + (C1*L1 + C1*L2 +
C2*L2 + C3*L2 + C3*L3 + C1*C3*Rout*Rin)*s^2 + (C3*Rout + C1*Rin)*s + 1)
((C1 C3 L2 Rout) s )/(C1 C2 C3 L1 L2 L3 s + (C1 C2 C3 L1 L2 Rout + C1 C2 C3 L2 L3
Rin)
      5
      s + (C1 C2 L1 L2 + C1 C3 L1 L2 + C1 C3 L1 L3 + C1 C3 L2 L3 + C2 C3 L2 L3 + C1
C2 C3 L2 Rout Rin)
      4
      s + (C1 C3 L1 Rout + C1 C3 L2 Rout + C2 C3 L2 Rout + C1 C2 L2 Rin + C1 C3 L2
Rin + C1 C3 L3 Rin)
      3
      s + (C1 L1 + C1 L2 + C2 L2 + C3 L2 + C3 L3 + C1 C3 Rout Rin) s^2 + (C3 Rout + C1
Rin) s + 1)
c1t =
C1*C3*L2*Rout*s^3
men =
C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 + C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 +
C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 + C1*C3*L2*L3*s^4 +
C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 + C2*C3*L2*Rout*s^3 +
C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 + C1*C3*Rout*Rin*s^2 +
C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 + C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 +
C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1
b =
  1.0e-25 *
  0.3233      0      0      0
a =
  0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    1.0000
b =
  1.0e-25 *
  0.3233      0      0      0
a =
  0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    1.0000

F =
            3.233e-26 s^3
-----
6.657e-44 s^6+6.245e-38 s^5+4.943e-29 s^4+3.088e-23 s^3+1.22e-14 s^2+3.802e-09 s+1

Continuous-time transfer function.

F =
            3.233e-26 s^3
-----
6.657e-44 s^6+6.245e-38 s^5+4.943e-29 s^4+3.088e-23 s^3+1.22e-14 s^2+
3.802e-09 s + 1

```

Prenosová funkcia má tvar:

$$F = \frac{c_0 s^3}{a_0 s^6 + a_1 s^5 + a_2 s^4 + a_3 s^3 + a_4 s^2 + a_5 s + a_6} \quad (2.17)$$

kde :

$$c_0 = C_1 C_3 L_2 R_l$$

$$\begin{aligned} a_0 &= C_1 C_2 C_3 L_1 L_2 L_3 \\ a_1 &= C_1 C_2 C_3 L_1 L_2 R_l + C_1 C_2 C_3 L_2 L_3 R_{in} \\ a_2 &= C_1 C_2 L_2 L_1 + C_1 C_3 L_2 L_1 + C_1 C_3 L_3 L_1 + C_1 C_3 L_2 L_3 + C_3 C_2 L_2 L_3 + C_1 C_2 C_3 L_2 R_{in} R_l \\ a_3 &= C_1 C_3 L_1 R_l + C_1 C_3 L_1 R_l + C_2 C_3 L_2 R_l + C_1 C_2 L_2 R_{in} + C_1 C_3 R_{in} L_2 + C_1 C_3 R_{in} L_3 \\ a_4 &= C_1 L_1 + C_1 L_2 + L_2 C_2 + C_3 L_2 + C_3 L_3 + C_1 C_3 R_{in} R_l \\ a_5 &= C_3 R_l + C_1 R_{in} \\ a_6 &= k \end{aligned}$$

Nuly a póly:

Nuly	Póly . $10^{-7}$
0	-0.0123 + 1.6433i
0	-0.0123 - 1.6433i
0	-0.0235 + 1.5706i
-	-0.0235 - 1.5706i
-	-0.0112 + 1.5014i
-	-0.0112 - 1.5014i

Tab. 2.1 Nuly a poly prenosu

### 2.3 Metóda uzlového napäťia

Metóda uzlového napäťia (MUN) je technika používaná na analýzu elektrických obvodov, najmä tých s viacerými uzlami alebo bodmi, kde sa stretáva viac prvkov obvodu. Táto metóda zahŕňa priradenie premennej napäťia ku každému uzlu v obvode a následné použitie Kirchhoffovho súčasného zákona (KCL) na vytvorenie systému rovníc, ktoré možno vyriešiť na určenie napäťia v každom uzle.

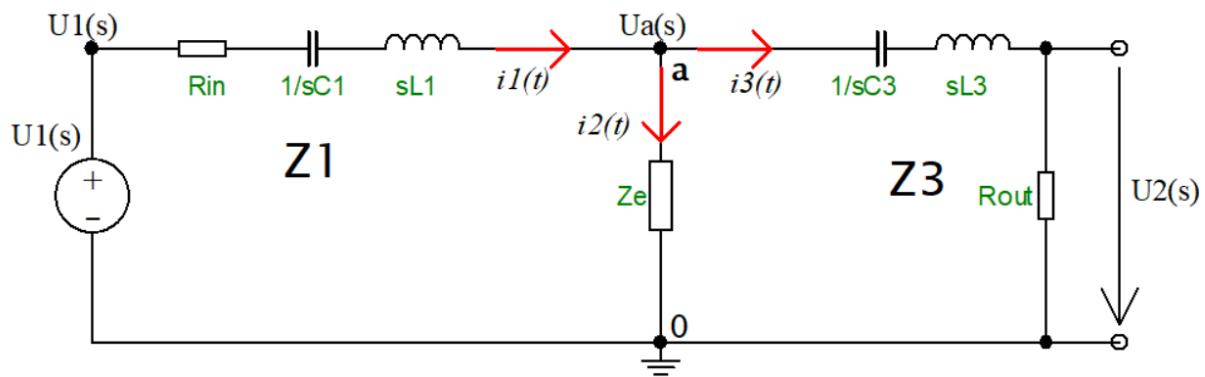
Tu sú všeobecné kroky, ktoré sa týkajú použitia metódy napäťia uzla na analýzu obvodu[6]:

- 1) Identifikujte uzly: Hľadajte akékoľvek body v obvode, kde sa stretávajú tri alebo viac prvkov obvodu. Toto budú uzly, ktoré budete musieť analyzovať pomocou metódy napäťia uzla.
- 2) Priradťte napäťia uzla: Predpokladajme referenčný uzol (zvyčajne ten, ktorý má najviac spojení) a priradťte premennú napäťia ku každému zo zostávajúcich uzlov v obvode vzhladom na referenčný uzol.
- 3) Napíšte rovnice KCL: Pomocou Kirchhoffovho súčasného zákona (KCL) napíšte rovnice pre súčet prúdov vstupujúcich alebo vychádzajúcich z každého uzla. Táto rovnica bude zahŕňať napäťia uzla a odpory a zdroje prúdu pripojené k uzlu.

- 4) Vyriešte systém rovnic: Teraz by ste mali mať systém rovnic, ktoré možno vyriešiť pre napäcia v uzloch. Tieto napäcia uzlov sa potom môžu použiť na výpočet prúdu cez každú vetvu obvodu.

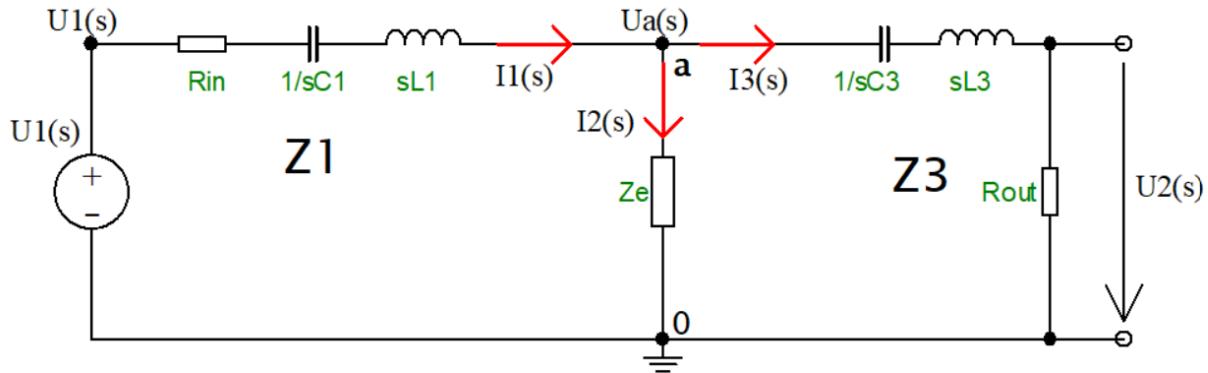
Metóda napäcia uzla môže byť obzvlášť užitočná na analýzu zložitých obvodov s viacerými uzlami, pretože vám umožňuje rozdeliť obvod na menšie, lepšie zvládnuteľné časti. Môže sa použiť aj v kombinácii s inými technikami, ako je metóda slučkového prúdu, aby sa získalo úplnejšie pochopenie správania obvodu.

V našom obvode sú iba dva uzly, z ktorých jeden bude s napäťom (a) a druhý s nulovým potenciálom (zem). Pre uzol s napäťom vypíšeme aj uzlové prúdy:



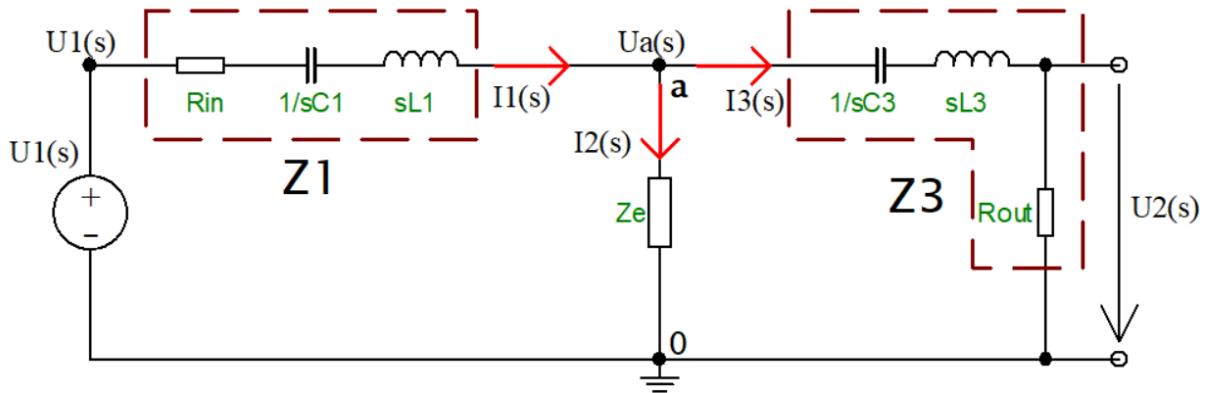
Obr. 2.5 Popis prúdov v uzle A

Táto schéma je uvedená nižšie zápisem pomocou Laplaceových operátorov:



Obr. 2.6 Popis prúdov v uzle A pomocou Laplaceových operátorov

Pre zjednodušenie výpočtov budú komplexné odpory dvoch vetiev zvýraznených bodkovanou čiarou podmienene označené impedanciami  $Z_1$  a  $Z_2$ :



Obr. 2.7 Elektrický obvod so zjednodušenými impedanciami

Tieto impedancie vypočítame podľa pravidla sériového zapojenia odporov:

$$Z_1 = R_{in} + sL_1 + \frac{1}{sC_1} \quad (2.5)$$

$$Z_3 = R_{out} + sL_3 + \frac{1}{sC_3} \quad (2.6)$$

Po uprave dostaneme:

$$Z_1 = \frac{s^2 L_1 C_1 + s R_{in} C_1 + 1}{s C_1} \quad (2.7)$$

$$Z_3 = \frac{s^2 L_3 C_3 + s R_{out} C_3 + 1}{s C_3}$$

Zoberme si uzol A. Zapíšme si preň prvý Kirchhoffov zákon:

$$I_1(s) - I_2(s) - I_3(s) = 0 \quad (2.15)$$

Nech je napätie v uzle A rovné  $U_a(s)$ . Každý prúd rovnice zapíšme podľa Ohmovho zákona ( $I = \frac{U}{R}$ ):

$$\frac{U_1(s) - U_a(s)}{Z_1} - \frac{U_a(s)}{Z_e} - \frac{U_a(s)}{Z_3} = 0 \quad (2.16)$$

$$U_a(s) \left[ \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_3} \right] = \frac{U_1(s)}{Z_1} \quad (2.1)$$

$$U_a(s) = \frac{U_1(s) Z_e Z_3}{Z_e Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_e Z_1} \quad (2.1)$$

$$U_2(s) = R_{out} I_3(s) \quad (2.1)$$

$$I_3(s) = \frac{U_a(s)}{Z_3} \quad (2.1)$$

Po dosadení:

$$U_2(s) = \frac{U_a(s) R_{out}}{Z_3} \quad (2.1)$$

$$U_2(s) = \frac{U_1(s) Z_e Z_3}{Z_e Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_e Z_1} * \frac{R_{out}}{Z_3} \quad (2.1)$$

Prechodovú funkciu budeme hľadať pomocou vzorca  
 $F(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)}$ . Do tohto vzorca dosadíme  $U_2(s)$ . V tomto prípade sa  $U_1(s)$  vzájomne zruší a dostaneme výsledný vzorec:

$$F = \frac{Z_e R_{out}}{Z_e Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_e Z_1} \quad (2.1)$$

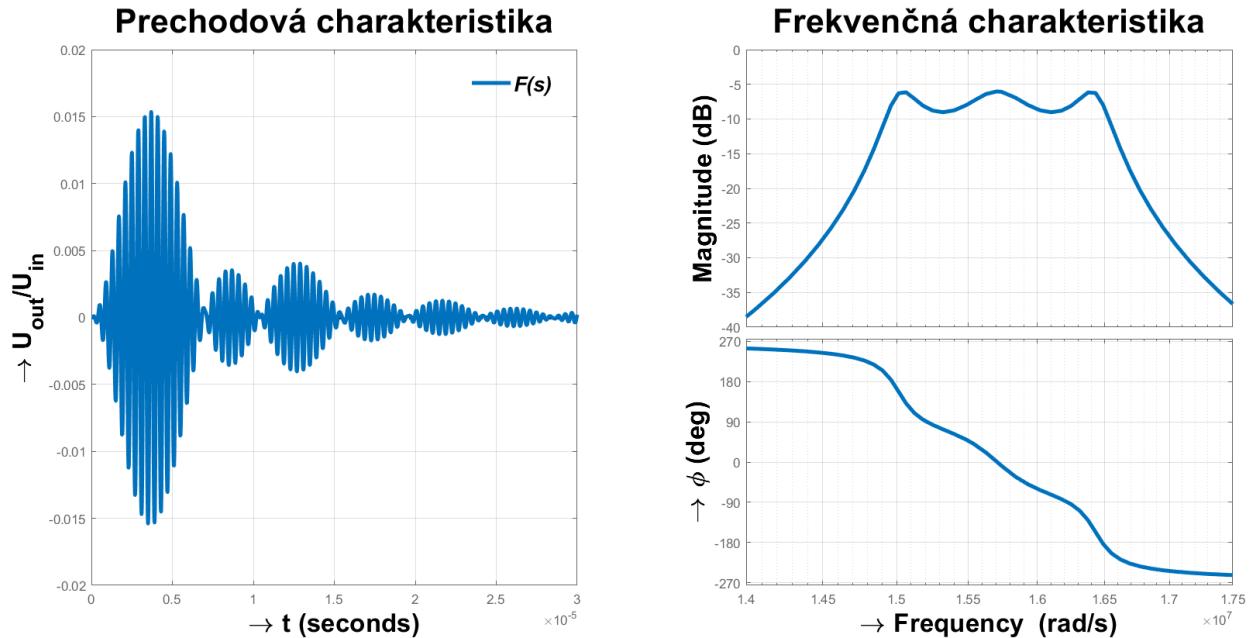
Pomocou MATLABu sme vypočítali impedancie a následne sme vypočítali aj samotnú prechodovú funkciu. V dôsledku toho sme dostali nasledujúci výpis z programu:

```
MUN
Ze =
(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1)
Z1 =
(C1*L1*s^2 + C1*Rin*s + 1)/(C1*s)
Z3 =
(C3*L3*s^2 + C3*Rout*s + 1)/(C3*s)
F =
(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + (C1*C2*C3*L1*L2*Rout +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin)*s^5 + (C1*C2*L1*L2 + C1*C3*L1*L2 + C1*C3*L1*L3 + C1*C3*L2*L3 +
C2*C3*L2*L3 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin)*s^4 + (C1*C3*L1*Rout + C1*C3*L2*Rout +
C2*C3*L2*Rout + C1*C2*L2*Rin + C1*C3*L2*Rin + C1*C3*L3*Rin)*s^3 + (C1*L1 + C1*L2 +
C2*L2 + C3*L2 + C3*L3 + C1*C3*Rout*Rin)*s^2 + (C3*Rout + C1*Rin)*s + 1)
((C1 C3 L2 Rout) s )/(C1 C2 C3 L1 L2 L3 s + (C1 C2 C3 L1 L2 Rout + C1 C2 C3 L2 L3
Rin))
      5
      s + (C1 C2 L1 L2 + C1 C3 L1 L2 + C1 C3 L1 L3 + C1 C3 L2 L3 + C2 C3 L2 L3 + C1
C2 C3 L2 Rout Rin)
      4
      s + (C1 C3 L1 Rout + C1 C3 L2 Rout + C2 C3 L2 Rout + C1 C2 L2 Rin + C1 C3 L2
Rin + C1 C3 L3 Rin)
      3
      s + (C1 L1 + C1 L2 + C2 L2 + C3 L2 + C3 L3 + C1 C3 Rout Rin) s^2 + (C3 Rout + C1
Rin) s + 1)
cit =
C1*C3*L2*Rout*s^3
men =
C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 + C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 +
C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 + C1*C3*L2*L3*s^4 +
C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 + C2*C3*L2*Rout*s^3 +
C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 + C1*C3*Rout*Rin*s^2 +
C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 + C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 +
C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1
b =
1.0e-25 *
0.3233      0      0      0
a =
0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0000
b =
1.0e-25 *
0.3233      0      0      0
a =
0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0000
```

$F =$

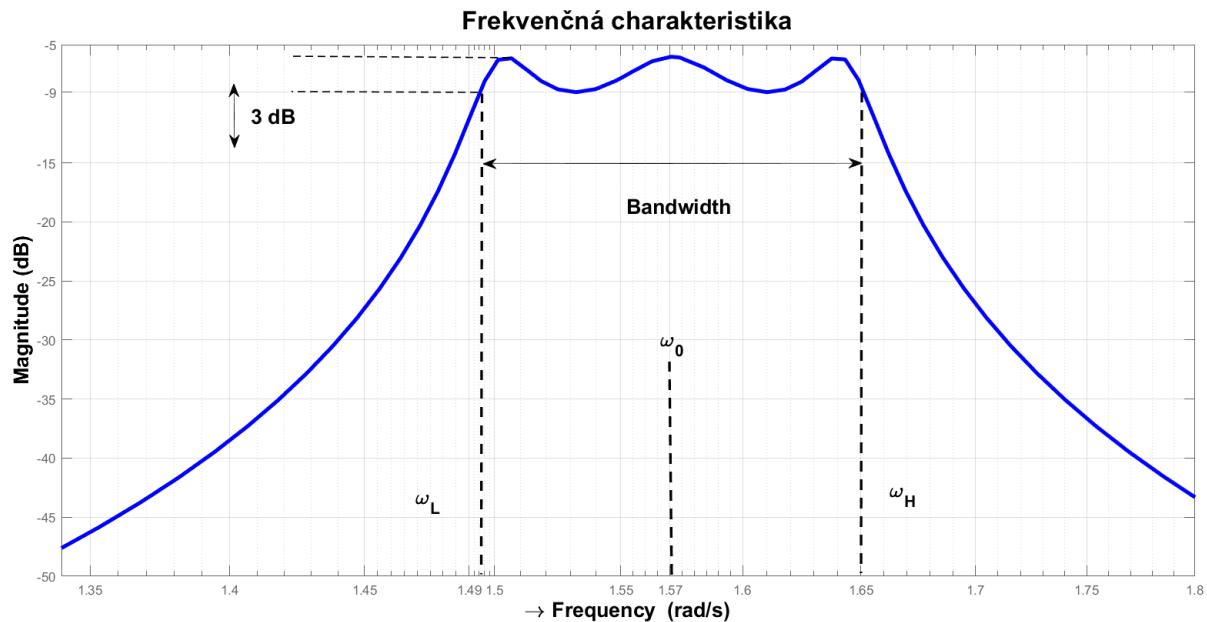
$$\begin{aligned} & 3.233e-26 \text{ s}^3 \\ \hline & 6.657e-44s^6 + 6.245e-38s^5 + 4.943e-29s^4 + 3.088e-23s^3 + 1.22e-14s^2 + 3.802e-09s + 1 \end{aligned}$$

Po výpočtoch v MATLABe sme dostali rovnakú prechodovú funkciu ako pri výpočte metódou MSP. To potvrdzuje správnosť našich výpočtov. Za predpokladu, že náš matematický model je správny, môžeme pristúpiť k ďalším bodom analýzy nášho systému.



Obr. 2.8 Prechodová charakteristika a logaritmické frekvenčné charakteristiky

Z prechodovej a frekvenčných-logaritmických charakteristik vidíme, že elektrický systém, ktorí analyzujeme, je filter typu - pásmový prieplust. Pozrime sa podrobnejšie na frekvenčnú charakteristiku. Vidíme, že frekvenčné pásmo, cez ktoré môže signál prejsť, je pomerne malé, čo sa vypočíta podľa vzorcov  $\Delta = \frac{\omega_H - \omega_L}{\omega_0}$  a  $BW = \Delta \cdot \omega_0$  ( $\omega = 2\pi f$ ). Kde  $\omega_0$  – frekvencia stredu,  $\omega_H$  – horná frekvencia prieplustného pásma,  $\omega_L$  – dolná frekvencia prieplustného pásma. Prechod zo zádržnej zóny do pásmu prieplustu a naopak je dosť strmý. Vzhľadom na to, že parametre obvodu  $L_1, C_1$  a  $L_3, C_3$  sú rovnaké, pásmo prieplustu je symetrickým vzhľadom na  $\omega_0$ . V prieplustnom pásmi vidíme tri vrcholy s amplitúdou 3 dB vzhľadom na hladší povrch v prieplustnom pásmi. Z všetkých týchto znakov vidíme, že ide o Chebyshov filter typu 1 a 3 radu (rad závisí od počtu L-C spojení v obvode). Z teoretických znalostí tohto filtra vieme vypočítať parametre obvodu tak, aby mal frekvenčnú charakteristiku akú potrebujeme.

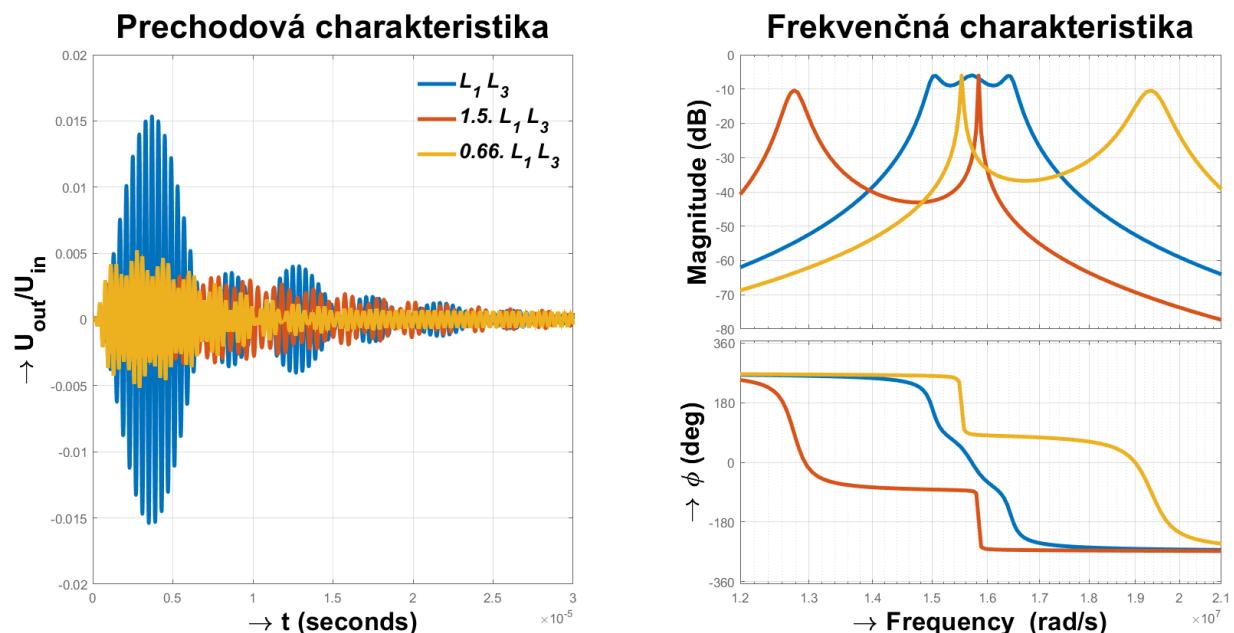


Obr. 2.9 Vlastnosti LFCh

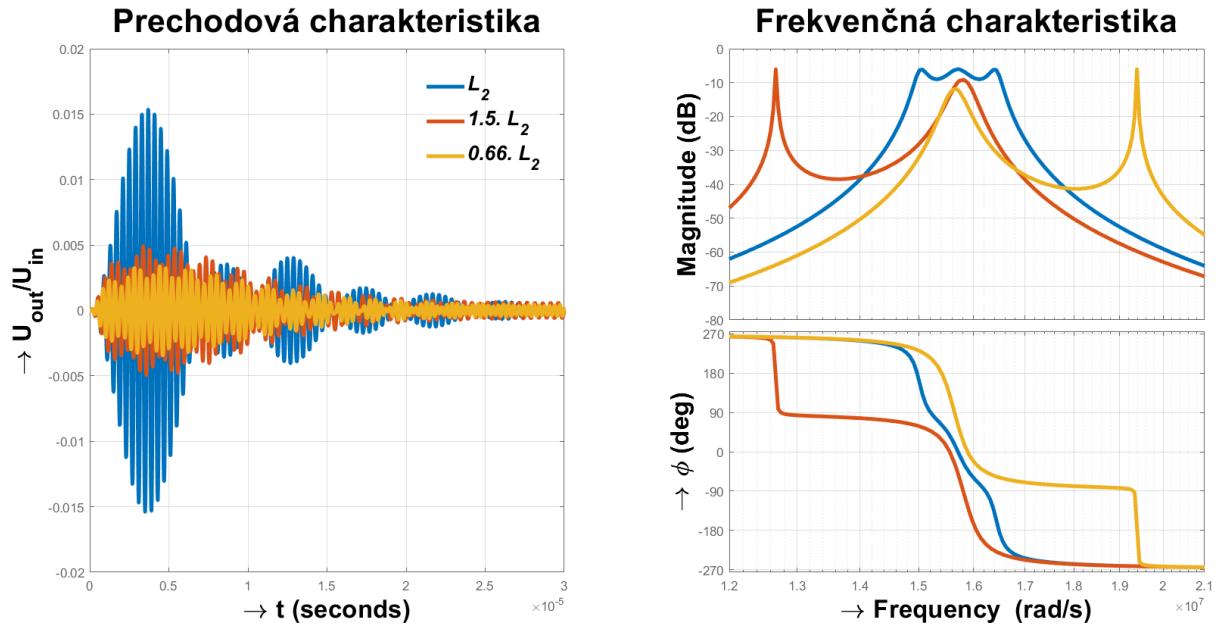
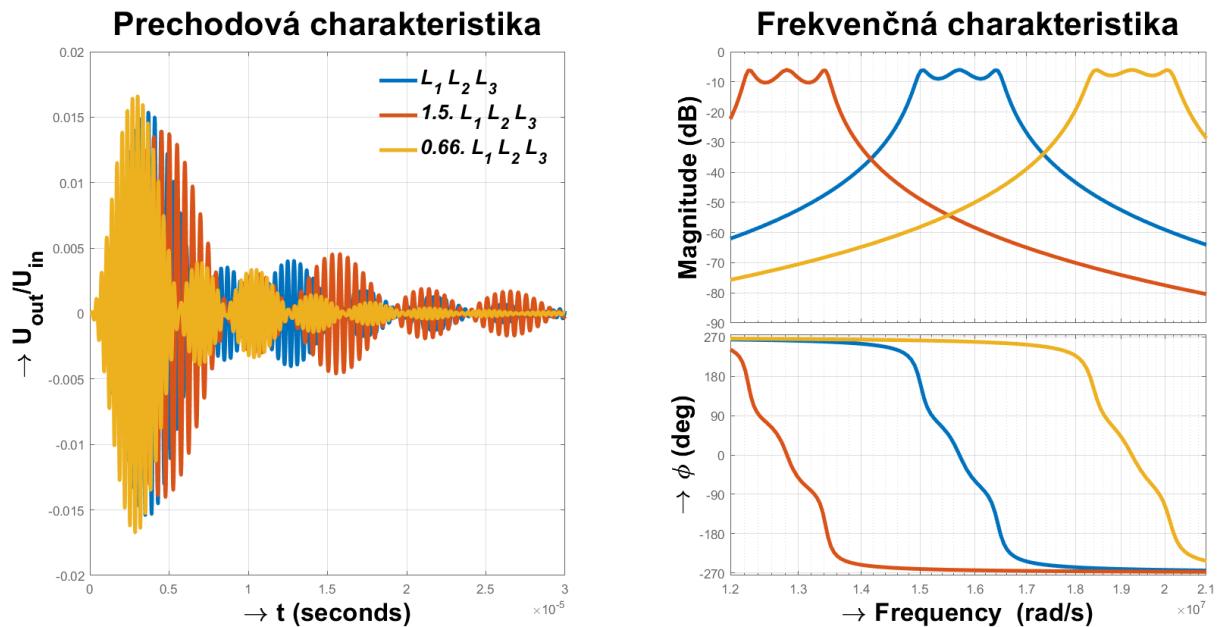
### 3 Zmena parametrov dynamického systému

V tejto časti budeme analyzovať vplyv parametrov elektrického obvodu, ako je indukčnosť, kapacita a odpor. Zmenou parametrov a porovnaním charakterísk bude efekt parametra pozorovateľný. Základné parametre obvodu:  $R_{in} = 50 \Omega$ ,  $R_{out} = 50 \Omega$ ,  $L_1 = 106,59 \mu\text{H}$ ,  $L_2 = 0,447 \mu\text{H}$ ,  $L_3 = 106,59 \mu\text{H}$ ,  $C_1 = 38 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 9,06 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 38 \text{ pF}$ .

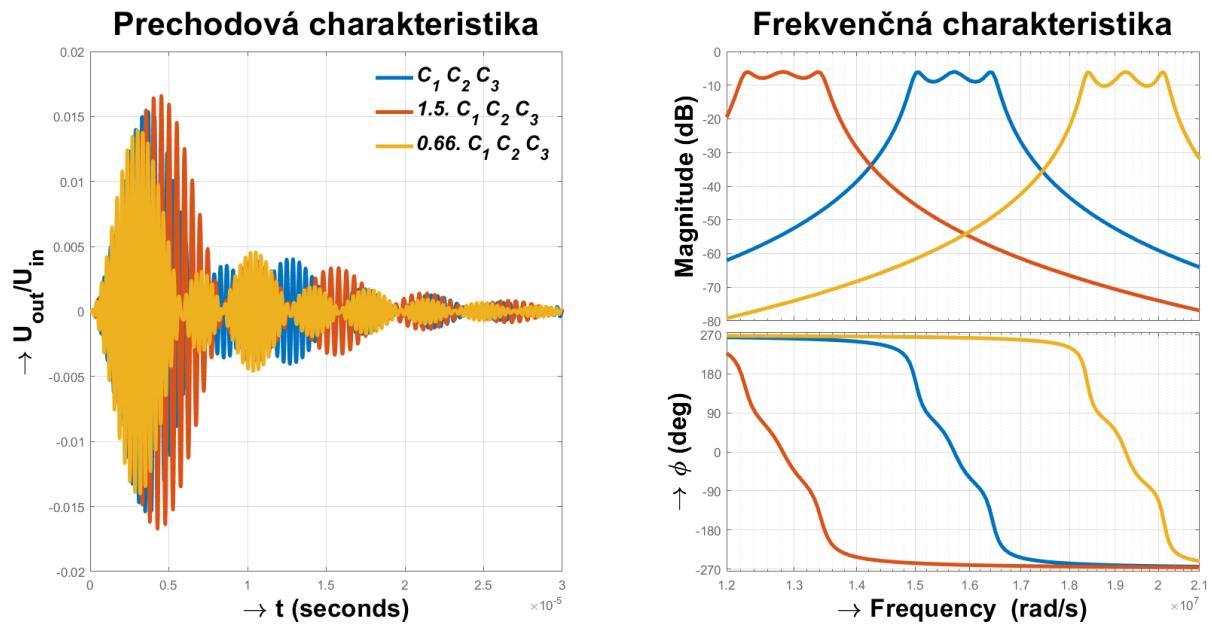
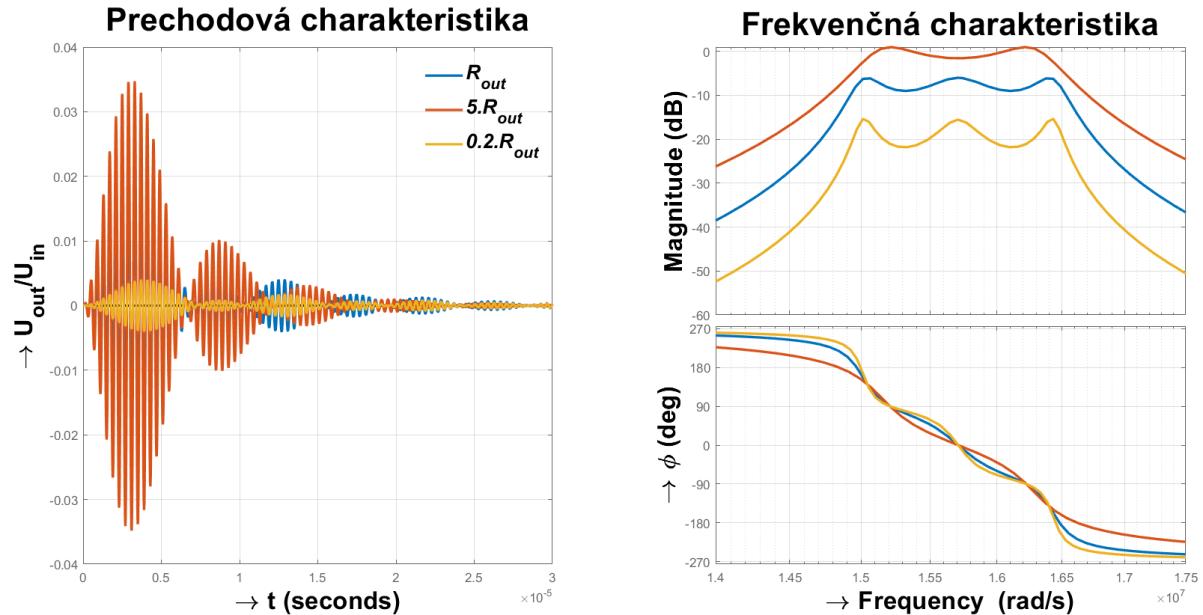
Parametre budeme zvyšovať a znižovať o rovnakú hodnotu. Prvý parameter, ktorí zmeníme, je  $L_1$  a indukčnosť  $L_3$ . Berieme naraz zmenu oboch indukčností, pretože v štandardnej forme nášho systému sú rovnaké, v dôsledku čoho má prieplustné pásmo symetrický tvar. Z charakterísk na Obr.3.1 vidíme, že táto zmena parametrov priviedie k posunu prieplustného pásmá aj jeho výraznému zvlneniu. Podobnú situáciu môžeme vidieť, ak zmeníme parameter  $L_2$ , Obr.3.2. Ale tvar pasiem je akoby zrkadlový vo vzťahu k charakteristikám, kde sme zmenili  $L_1$  a  $L_2$ . Na Obr.3.3 sme zmenili všetky indukčnosti v obvode o rovnakú hodnotu. V dôsledku toho môžeme vidieť, že zosilnenie na prechodovej charakteristike klesá a čas ustálenia zvýšovaním indukčnosti sa zväčšuje. Na logaritmickej frekvenčnej charakteristike vidíme, že zmenou indukčnosti sa mení poloha prieplustného pásmá, pričom šírka prieplustu a amplitúda sú zachované. Zmenou indukčnosti sa zväčší zvlnenie v prieplustnom pásmi keď sa indukčnosť zniží, pásmo sa vyhľadí.



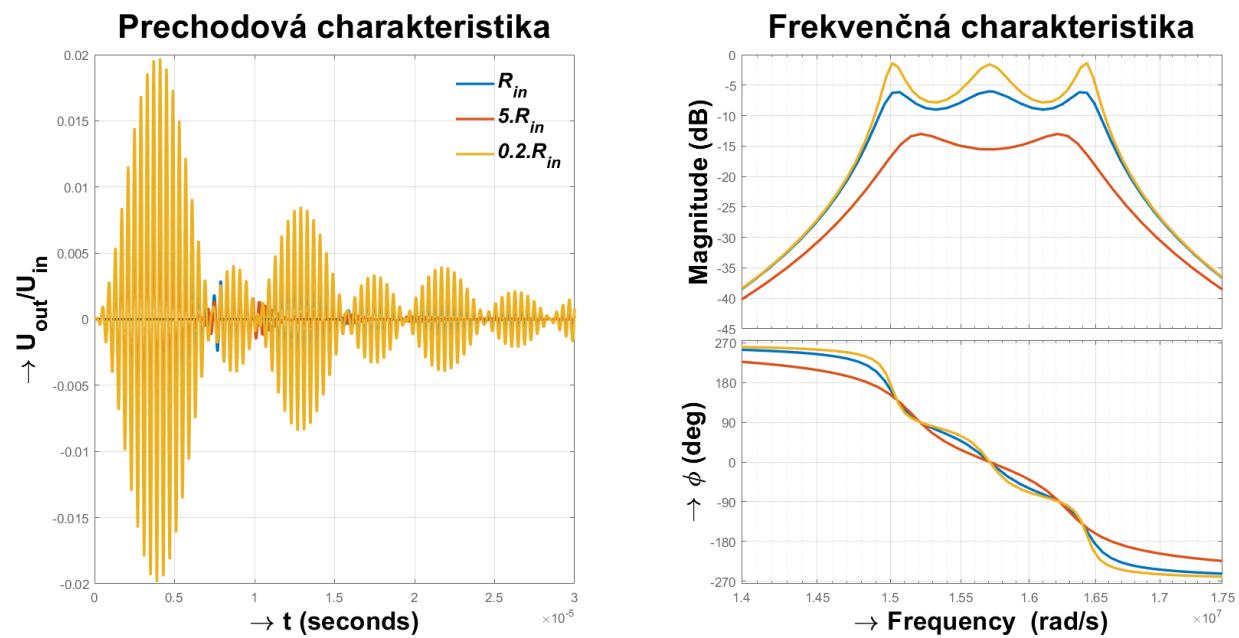
Obr. 3.1.1 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov  $L_1$  a  $L_3$

Obr. 3.2 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra  $L_2$ Obr. 3.3 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov  $L_1, L_2$  a  $L_3$ 

Pri analýze zmeny kapacity pre nás systém zmeníme všetky hodnoty na kondenzátoroch o rovnakú hodnotu, rovnako, ako pri cievkach, pretože zmena jednotlivých kapacít priviedie k podobným výsledkom ako zmena jednotlivých indukčností. Na Obr.3.4 môžeme vidieť, že zosilnenie prechodovej charakteristiky sa zvyšuje so zvyšujúcimi sa hodnotami kapacity. Na frekvenčnej charakteristike vidíme posun prieplustných pásiem na logaritmickej priamke so zachovaním amplitúdy a šírky pásma. Ked' sa kapacita zvyšuje, frekvencia centru na logaritmickej priamke sa znižuje a pásmo sa stáva hladším, zníži sa zvlnenie.

Obr. 3.4 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov  $C_1, C_2$  a  $C_3$ Obr. 3.5 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra  $R_{out}$ 

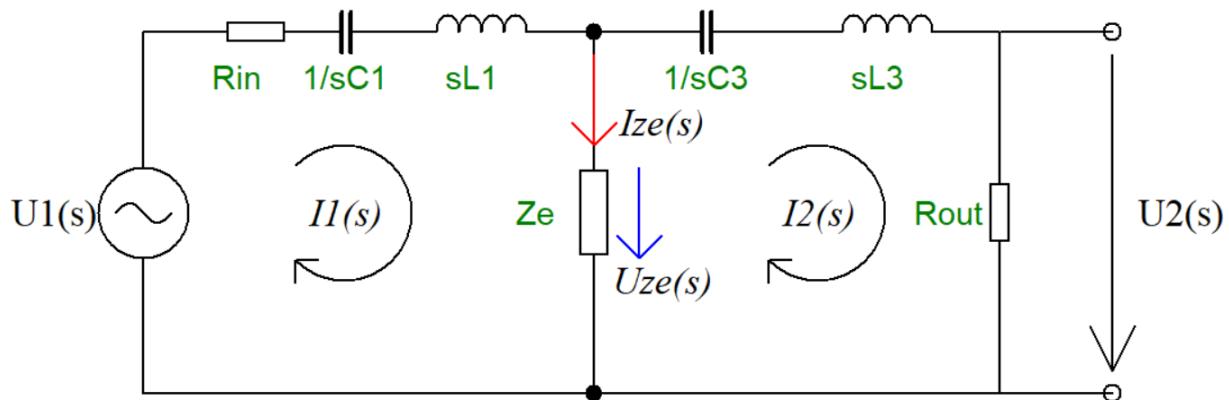
Analyzujme zmenu odporu  $R_{in}$  a  $R_{out}$ , Obr.3.5-6. Ked' sa odpor  $R_{out}$  zvýši, zosilnenie prechodovej charakteristiky sa zvýši, na rozdiel od zvýšenia odporu  $R_{in}$ , kde je naopak. Na frekvenčnej charakteristike vidíme, že zvýšenie odporu  $R_{out}$  priviedie k zvýšeniu amplitúdy prieplustného pásma a k vyhľadeniu pásma. Ked' sa odpor  $R_{in}$  zvýši, amplitúda pásma sa zníži a tiež sa vyhľadí.

Obr. 3.6 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra  $R_{in}$

## 4 Model v Simulinku

Pomocou diferenciálnych rovníc, ktoré sme zostavili vyššie, môžeme zostaviť simulačný model, ktorý môžeme simulovať v programe Simulink. Tento model bude prezentovaný vo forme blokovej schémy. Výhodou simulačného modelu je pomerne ľahko vnímateľný tvar, možnosť vyčleniť určité prvky systému, sledovať priebeh vstupných a výstupných hodnôt ako aj priebeh jednotlivých signálov v strede systému. Keďže vychádzame z rovnakých diferenciálnych rovníc, môžeme sledovať priebeh prenosovej funkcie na výstupe.

Skladanie blokového diagramu začína od konca. Naša bloková schéma sa bude skladať z troch časti, preto vyjadrimo naše výstupné hodnoty z našich diferenciálnych rovníc na základe I a II Kirchhoffovho zákonov tak, že pri zostavovaní diagramu použijeme iba integračné, násobiace, sčítacie a odčítacie operácie.



Obr. 4.1 Elektrický obvod filtra

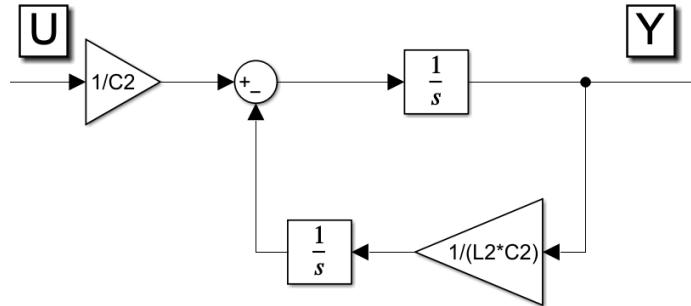
Výpočet zjednodušenej impedancie v blokovej schéme:

$$Z_e = \frac{L_2 s}{1 + L_2 C_2 s^2} = \frac{Y}{U} \quad (4.1)$$

Z čoho vyplýva:

$$Y = \frac{1}{s} \left( \frac{U}{C_2} - \frac{Y}{s L_2 C_2} \right) \quad (4.2)$$

Bloková schéma:



Obr. 4.2 Simulačná schéma podsystému s paralelnou LC impedanciou  $Z_e$

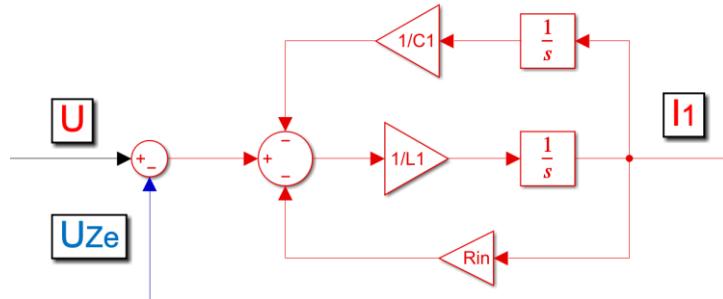
Rovnica pre **prvú slučku**:

$$U_i(s) = \left( R_{in} + \frac{1}{C_1 s} + L_1 s \right) I_1(s) + U_{Ze} \quad (4.3)$$

Z čoho vyplýva:

$$I_1(s) = \frac{U(s) - U_{Ze}(s)}{R_{in} + L_1 s + \frac{1}{C_1 s}} \quad (4.4)$$

Dielčia schéma:



Obr. 4.3 Simulačná schéma pre prvú slučku

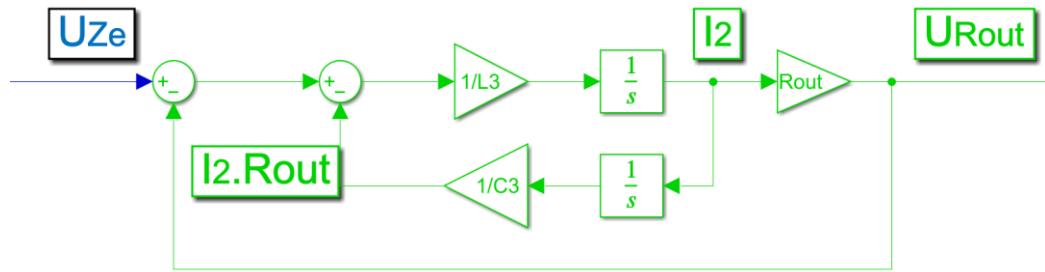
Rovnica pre **druhú slučku**:

$$U_{Ze}(s) = \left( R_{out} + \frac{1}{C_3 s} + L_3 s \right) I_2(s) \quad (4.5)$$

Z čoho vyplýva:

$$I_2(s) = \frac{U_{Ze}(s) - R_{out} I_2(s)}{L_3 s + \frac{1}{C_3 s}} \quad (4.6)$$

Dielča schéma:



Obr. 4.4 Simulačná schéma pre prvú slučku

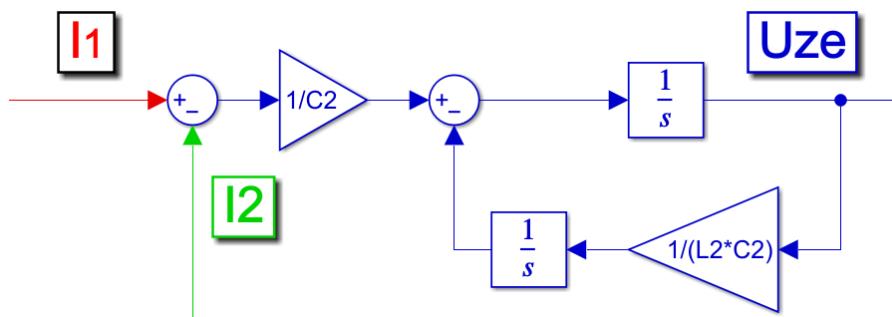
Rovnica pre **uzol A**:

$$I_{Ze}(s) = I_1(s) - I_2(s) = \frac{U_{Ze}}{Z_e} \quad (4.7)$$

Z čoho vyplýva:

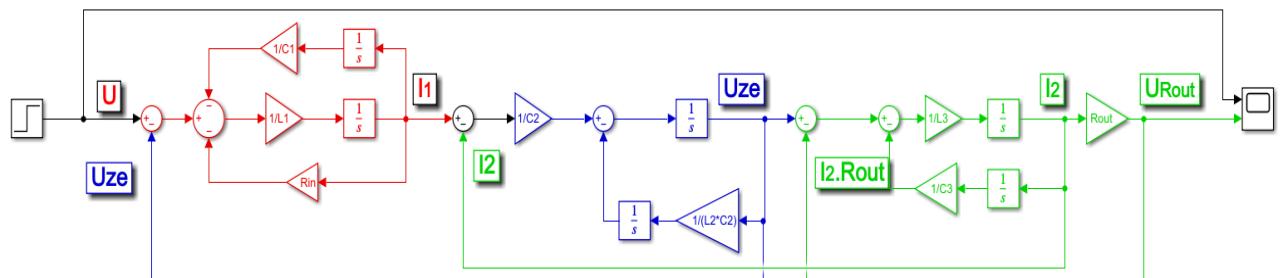
$$U_{Ze}(s) = (I_1(s) - I_2(s))Z_e \quad (4.8)$$

Dielčia schéma:

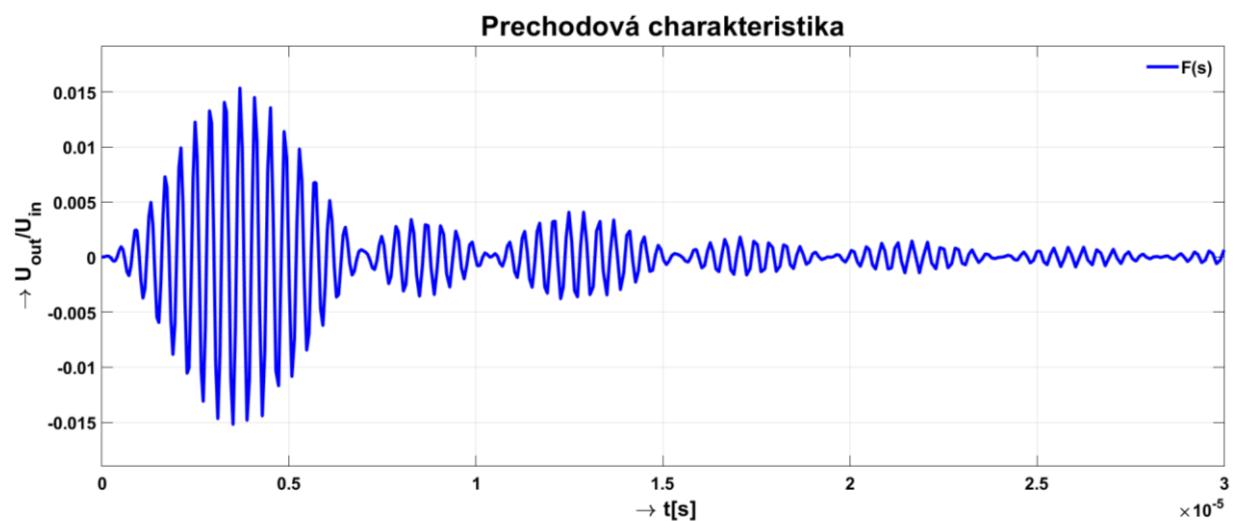


Obr. 4.5 Simulačna schéma pre uzol A

Finálna bloková schéma:



Obr. 4.6 Finálna simulačná schéma v Simulink



Obr. 4.7 PrCh zo schémy v Simulink

Priebeh ma rovnaký tvar ako na Obr.2.5, kde sme modelovali pomocou prenosovej funkcie. To znamená, že náš model v Simulinku je správny.

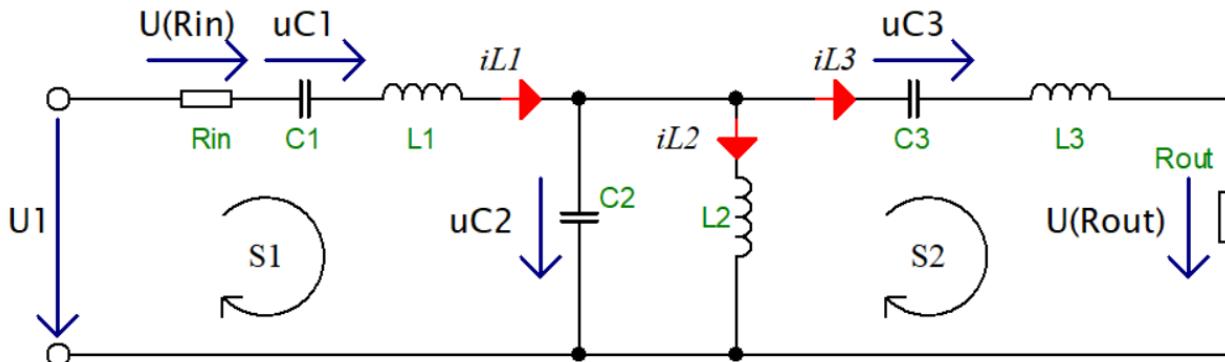
## 5 Odvodenie stavového modelu systému

### 5.1 Stavový popis systému

Stavový popis umožňuje zmodelovať nás systém ďinou metodou z využitím stavového priestoru (SS – State Space). Výhodou toho metóda oproti priameho modelovania z diferenciálnych rovníc je to, že uvažuje informácie o vnútorných premenných (stavoch systému). Kvôli tomu, že výsledné zobrazenie systémových parametrov a premenných je maticovom tvare, môžeme ľahko zmodelovať nás systém v MATLAB.

### 5.2 Zostavenie stavového modelu elektrického systému

Stavovými veličinami sú tu prúd indukčnosťou  $i_L$ , lebo existuje derivácia  $u_L = L \frac{di_L}{dt}$  a napätie na kondenzátore  $u_C$ , lebo existuje derivácia  $i_C = C \frac{du_C}{dt}$ . Stavový model nášho systému odvodíme z diferenciálnych rovníc I a II Kirchhoffovho zákonov a na základných vlastnostiach elektrického obvodu. Všetky stavové veličiny majú fyzikálny význam. Vstupom do obvodu je vstupné napätie  $u_i$  (index  $i$  – input) a na výstupe dostávame výstupné napätie (napätie na kondenzátore)  $u_o = u_{RL}$  (index  $o$  – output). Počet rovníc pre stavový popis rovná sa počtu zásobníkov energie v elektrickom obvode, v našom prípade mame 3 cievky a 3 kondenzátory[8].



Obr. 5.1 Elektrický obvod filtra s popisom stavových velečín

Zapišeme rovnice pre naše dve slučky, suma všetkých napätií v slučke sa rovná 0.

S1:

$$-u_i + R_{in}i_{L1} + u_{C1} + L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_2 = 0 \quad (5.1)$$

S2:

$$-u_{C2} + R_{out}i_{L3} + u_{C3} + L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = 0 \quad (5.2)$$

Algebraicka suma prúdov v uzle A sa rovná 0.

A:

$$i_{L1} - i_{L2} - i_{L3} - C_2 \frac{du_{C2}}{dt} = 0 \quad (5.3)$$

Prúd, ktorý tečie vo vetve so sériovým zapojením je rovnaký na každom prvku.

$$C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1} \quad (5.4)$$

$$C_3 \frac{du_{C3}}{dt} = i_{L3} \quad (5.5)$$

Napätie v paralelnom obvode je rovnaké na každej vetve.

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = u_{C2} \quad (5.6)$$

Vyjadrimo z rovníc prvú deriváciu stavovej veličiny.

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{u - u_{C1} - u_{C2} - R_{in}i_{L1}}{L_1} \quad (5.7)$$

$$\frac{di_{L3}}{dt} = \frac{u_{C2} - u_{C3} - R_{out}i_{L3}}{L_3} \quad (5.8)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{u_{C2}}{L_2} \quad (5.9)$$

$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{i_{L1} - i_{L2} - i_{L3}}{C_2} \quad (5.10)$$

$$\frac{du_{C1}}{dt} = \frac{i_{L1}}{C_1} \quad (5.11)$$

$$\frac{du_{C3}}{dt} = \frac{i_{L3}}{C_3} \quad (5.12)$$

Prepišeme rovnice do matice stavového popisu, základný tvar ktorého vyzerá:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{b}\mathbf{u}(\mathbf{t}) \\ \mathbf{y}(\mathbf{t}) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{d}\mathbf{u}(\mathbf{t}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Prepis do maticového zápisu stavového modelu:

$$\begin{bmatrix} sI_{L1} \\ sI_{L2} \\ sI_{L3} \\ sU_{C1} \\ sU_{C2} \\ sU_{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{in}}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{out}}{L_3} & 0 & \frac{1}{L_3} & \frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U_i \quad (5.14)$$

$$U_{RL} = [0 \ 0 \ R_{out} \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \end{bmatrix} + [0] \cdot U_i$$

### 5.3 Zostavenie priebehov LFCh a PrCh stavového modelu s pomocou MATLABu a Simulinku

Výpisy z MATLABu (preformátované):

Stavový model v symbolickom tvare:

```
A =
[-Rin/L1,      0,      0, -1/L1, -1/L1,      0]
[      0,      0,      0,      0,  1/L2,      0]
[      0,      0, -Rout/L3,      0,  1/L3, -1/L3]
[ 1/C1,      0,      0,      0,      0,      0]
[ 1/C2, -1/C2, -1/C2,      0,      0,      0]
[      0,      0,  1/C3,      0,      0,      0]
```

b =

```
1/L1
0
0
0
0
0
```

cT =

```
[0, 0, Rout, 0, 0, 0]
```

d =

```

0
Stavový po dosadení hodnôt parametrov:
A =
1.0e+10 *
-0.0000      0      0   -0.0000   -0.0000      0
      0      0      0       0   0.0002      0
      0      0   -0.0000       0   0.0000   -0.0000
2.6301      0      0       0       0      0
0.0110   -0.0110   -0.0110       0       0      0
      0      0   2.6301       0       0      0

b =
1.0e+03 *
9.3815
      0
      0
      0
      0
      0

cT =
      0      0     50      0      0      0

d =
      0

Výpis prenosovej funkcie:
nums =
1.0e+17 *
      0      0      0   4.8564   0.0000   9.8313   -0.0000

dens =
1.0e+43 *
0.0000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000   1.5022

Fss =
3.233e-26 s^3 + 1.644e-34 s^2 + 6.545e-26 s - 7.87e-43
-----
6.657e-44 s^6 + 6.245e-38 s^5 + 4.943e-29 s^4 + 3.088e-23 s^3 + 1.22e-14 s^2 + 3.802e-09 s + 1

```

Póly prenosovej funkcie Fss:

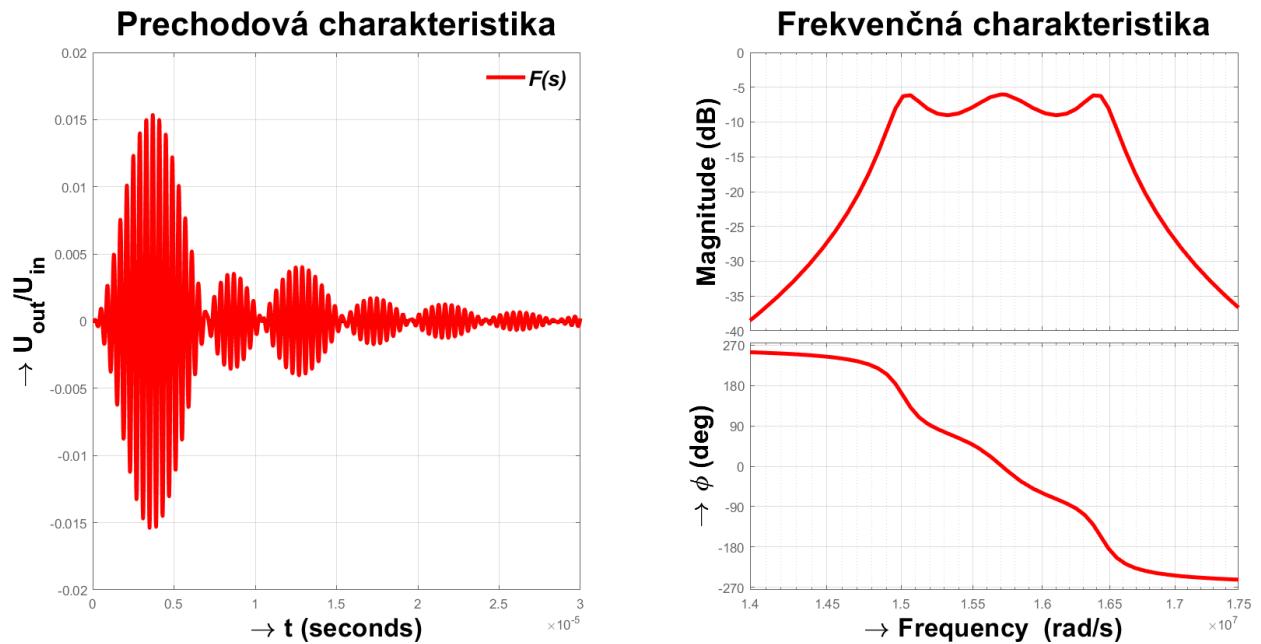
```

p =
1.0e+07 *
-0.0123 + 1.6433i
-0.0123 - 1.6433i

```

$-0.0235 + 1.5706i$   
 $-0.0235 - 1.5706i$   
 $-0.0112 + 1.5014i$   
 $-0.0112 - 1.5014i$

Zobrazenie prechodovej a frekvenčnej charakteristiky:



Obr. 5.2 PrCh a LFCh odvodené zo stavového popisu

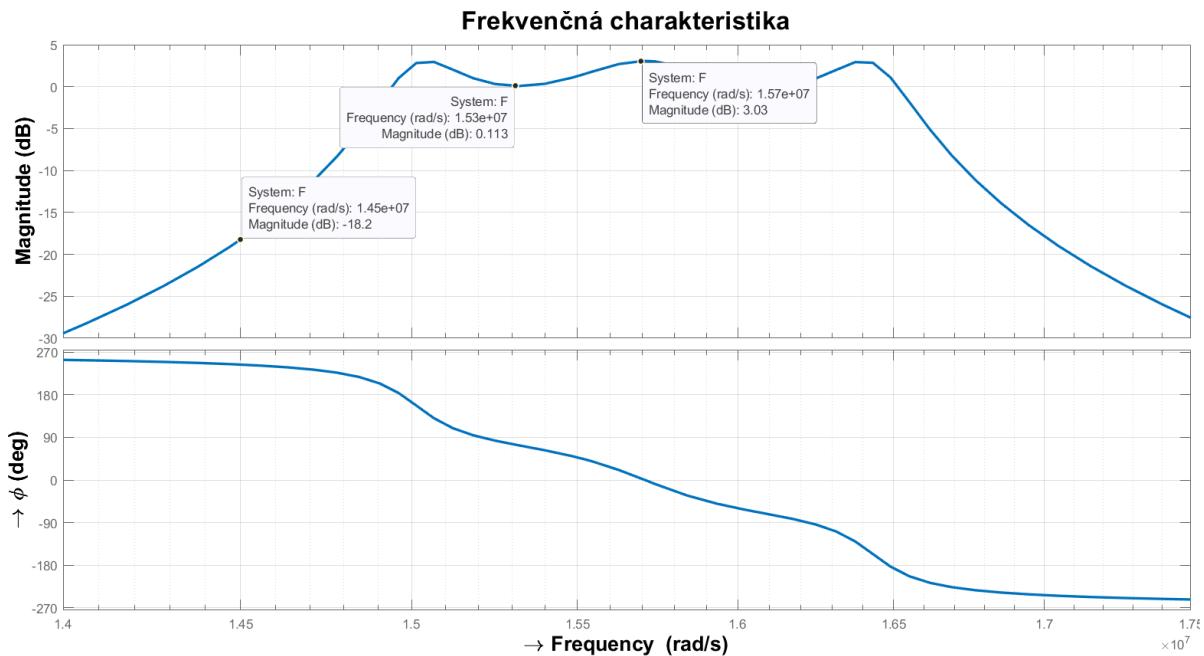
Priebehy majú veľmi podobný tvar ako na obr. a Obr.2.5 Kde sme modelovali pomocou prenosovej funkcie a v druhom prípade odozva modelu v Simulinku. Podobnosť grafov nám ukazuje na správnosť zostavenia modelu v stavovom priestore. Prenosová funkcia ktorá nám vyšla z stavového popisu ma iní tvar, v čitateli sa objavili členy nižších radov, menovateľ sa nezmenil. To je výsledok presnosti tejto metódy, pretože pozoruje aj priebeh vnútorných vellečín. Frekvencia centru a šírka pasmá viditeľne sa nezmenila.

## 6 Odozva systému na harmonický budiaci signál

V tejto úlohe budeme analyzovať vplyv harmonického budiaceho signálu na nás elektrický obvod. Z LFCh nášho systému môžeme vidieť, že pri rôznych frekvenciach signálu pôsobiacich na nás systém sa mení amplitúda a fáza výstupného signálu. Toto je hlavná vlastnosť elektrického filtra.

### 6.1 Analýza LFCh

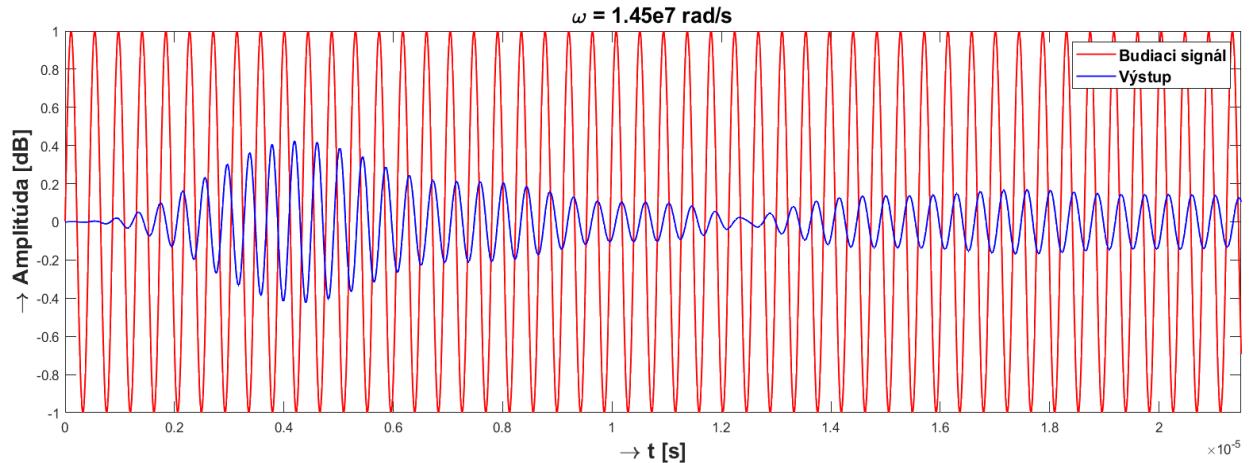
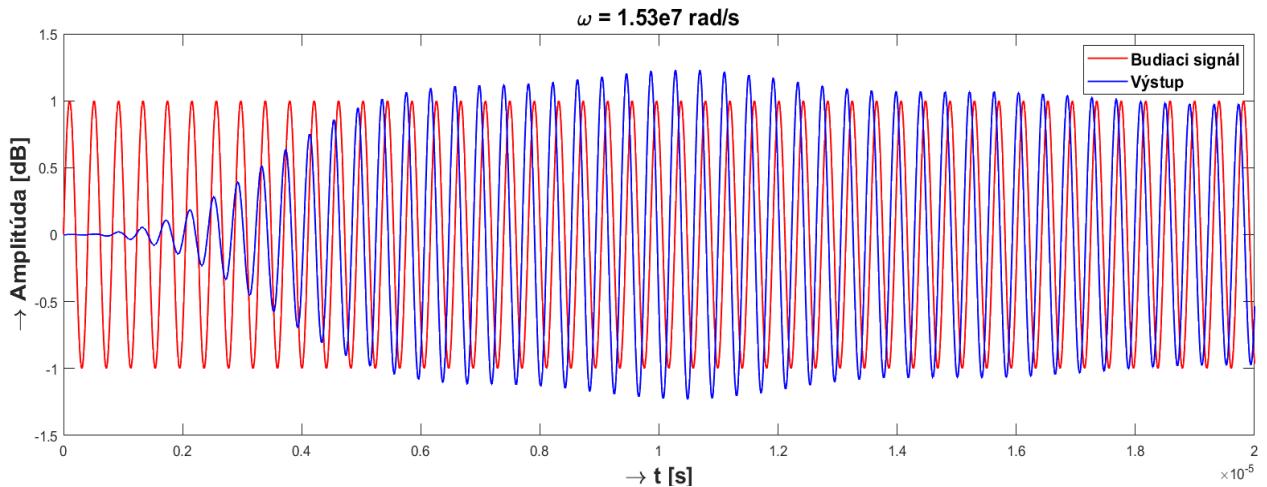
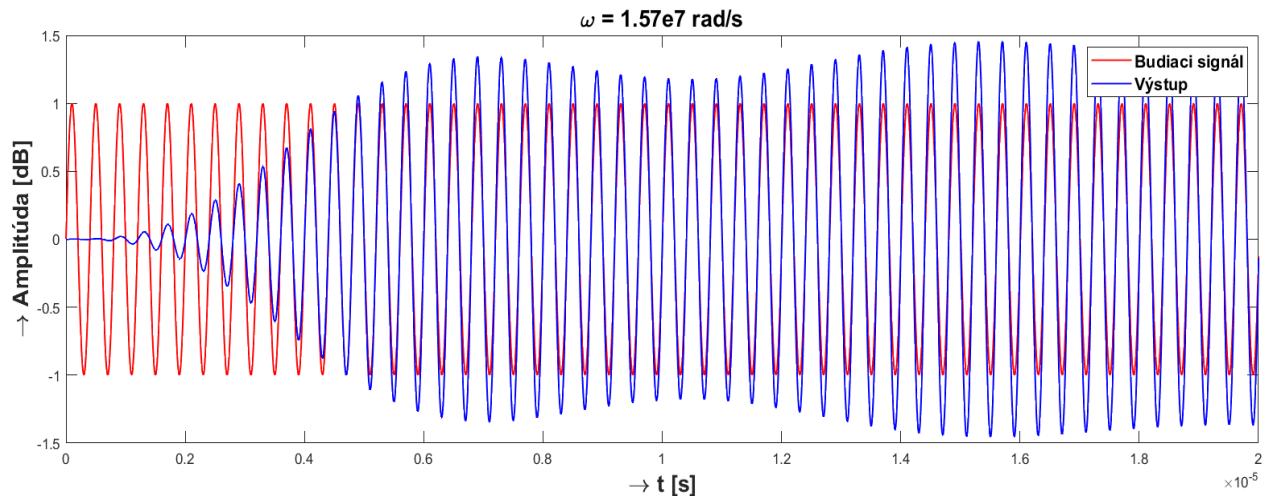
Pre lepšiu viditeľnosť zväčšíme systém o hodnotu **2.85**. V tomto prípade bude prieplustné pásmo prechádzať na hodnote 0 dB. To znamená, že vstupné a výstupné signály budú mať rovnakú amplitúdu. Zvlnenie v prieplustnom pásmi vo výške 3 dB, ktoré sme si sami upravili, bude v absolútnej hodnote zodpovedať 3 dB.



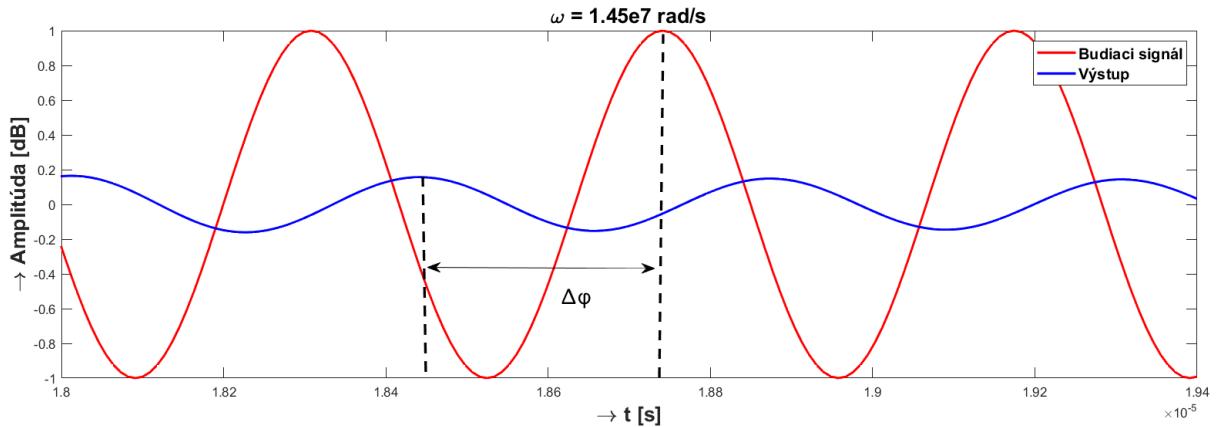
Obr. 6.1 LFCh sýstemu zosilneneho o hodnotu 2.85.

Obr.6.1 ukazuje LFCh po zosilnenii sústavy o hodnotu **2.85**. Na LFCh Obr.6.1 sú tiež vyznačené 3 body zodpovedajúce frekvenciám, v ktorých budeme testovať vlastnosti systému. Prvý bod je na strmom náraste amplitúdy, druhý bod je na úrovni prieplustného pásma, tretí bod na vrcholu zvlnenia. Vygenerujme na vstupe systému jednotkový harmonický signál s príslušnou frekvenciou, ktorú budeme meniť. Simulácia tohto zadania bola realizovaná v MATLABe pomocou príkazov *gensig* a *lsim*.

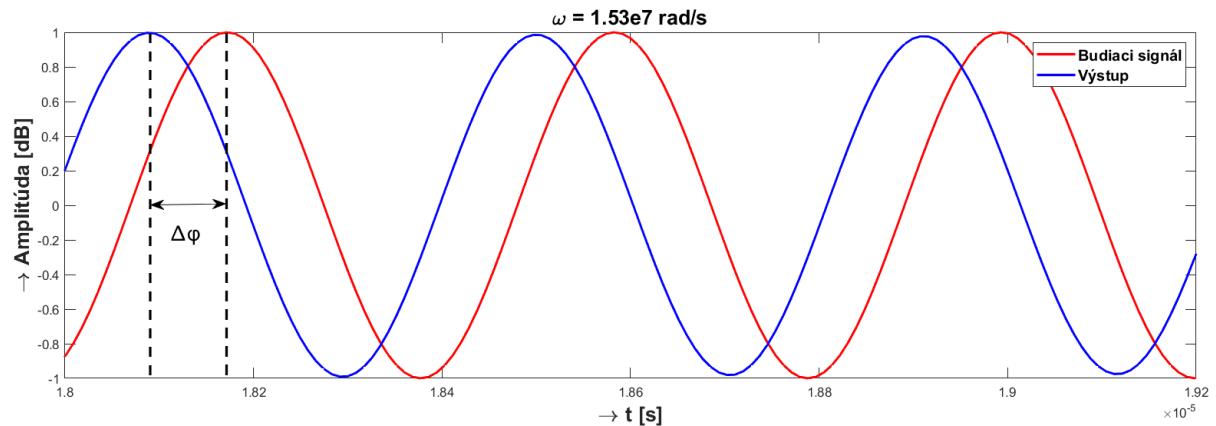
## 6.2 Odozvy

Obr. 6.2 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.45\text{e}7 \text{ rad/s}$ Obr. 6.3 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.53\text{e}7 \text{ rad/s}$ Obr. 6.4 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.57\text{e}7 \text{ rad/s}$

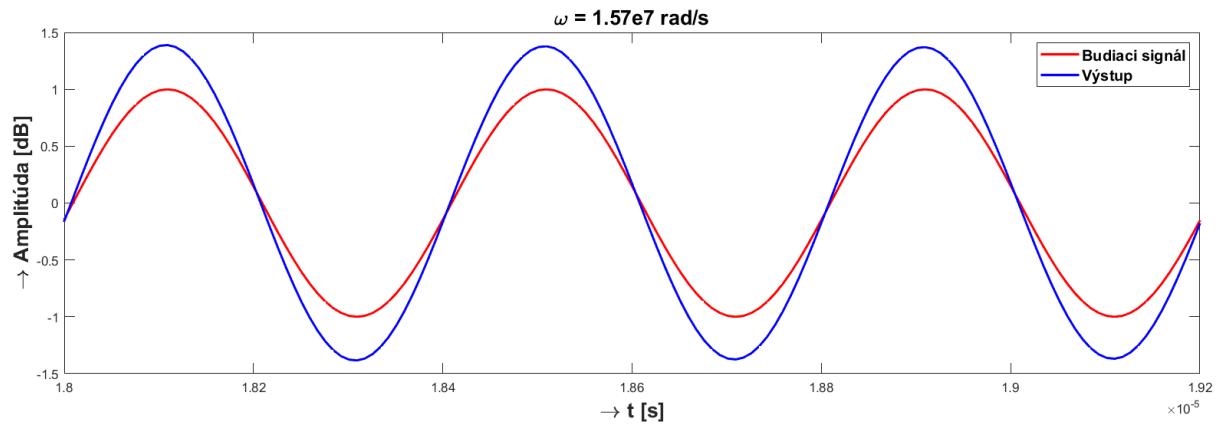
Na Obr.6.2-4 sledujme odozvu na v rozsahu 50 períod vstupného harmonického signálu pričom  $\omega = 2\pi f$ . Vidíme, že amplitúda výstupného signálu závisí od frekvencie vstupného signálu v súlade s priebehom LFCh. Pre podrobnejšiu analýzu znížme rozsah sledovania na 3 períody vstupného signálu a zvolíme dobu, kedy je efekt stabilný.



Obr. 6.5 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$

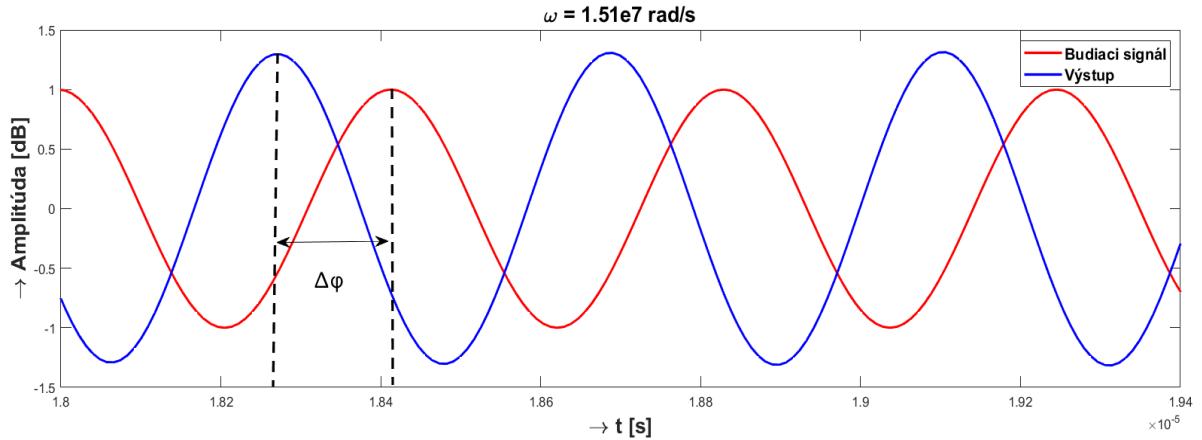


Obr. 6.6 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$



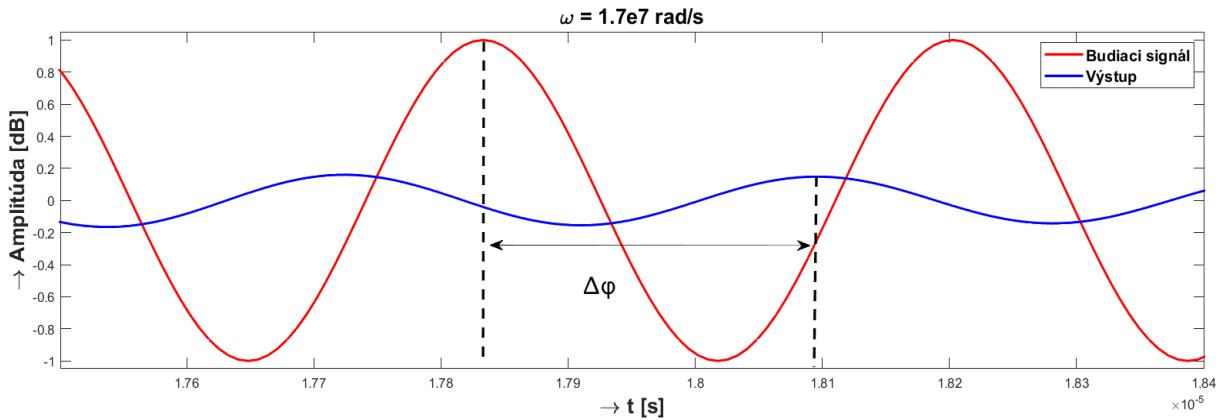
Obr. 6.7 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$

Na Obr.6.5-7 môžeme vidieť aj fázový posun medzi vstupným a výstupným signálom. Ak porovnáme tento fázový posun na Obr.6.5-7 a fázové hodnoty pre body, ktoré sme vybrali na LFCh (Obr.1), vidíme, že tieto hodnoty sú rovnaké. Na Obr.7 vidíme nulový posun a najvyššiu amplitúdu výstupného signálu, frekvencia vstupného signálu je v tomto prípade rezonančná frekvencia a bod na strednom vrchole zvlnenia na LFCh (Obr.6.1) je bod rezonancie. Na LFCh (Obr.1) môžeme vidieť ďalšie dva rezonančné body, na dvoch krajných vrcholoch. Fázový posun pri tych rezonančných frekvenciach je  $\pm 130$  stupňov, Obr.6.8 (fázový posun 130 stupňov) LFCh.



Obr. 6.8 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii  $\omega = 1.51e7 \text{ rad/s}$

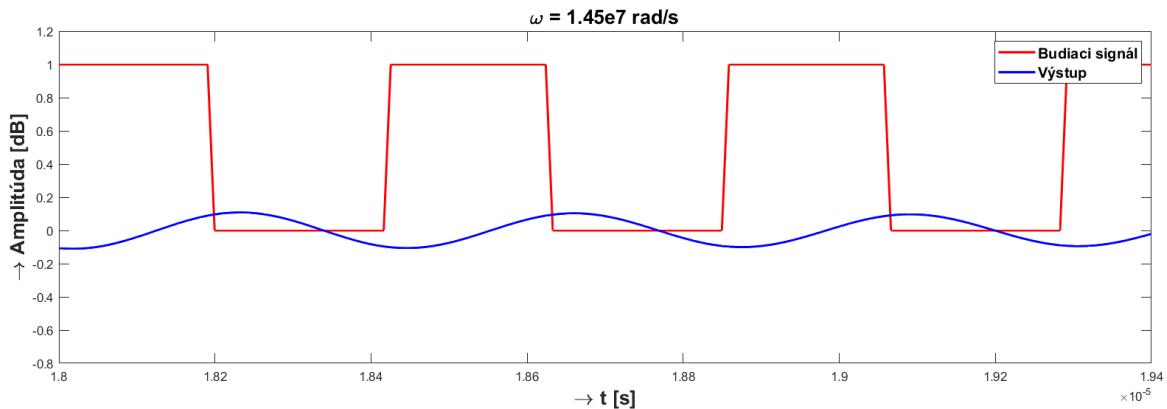
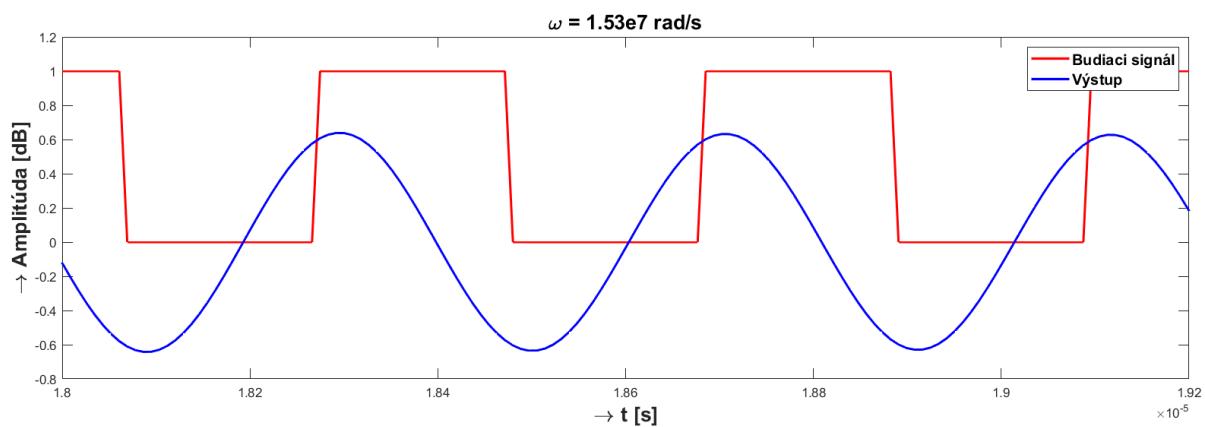
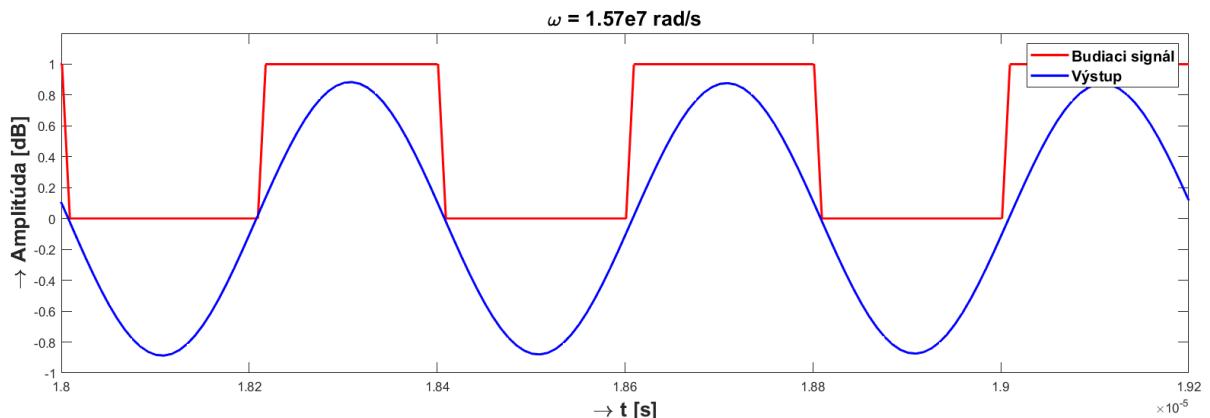
Táto úloha analýzy harmonickej odozvy systému vám pomôže lepšie pochopiť, ako treba čítať LFCh a čo táto charakteristika znamená z hľadiska vstupných a výstupných signálov.

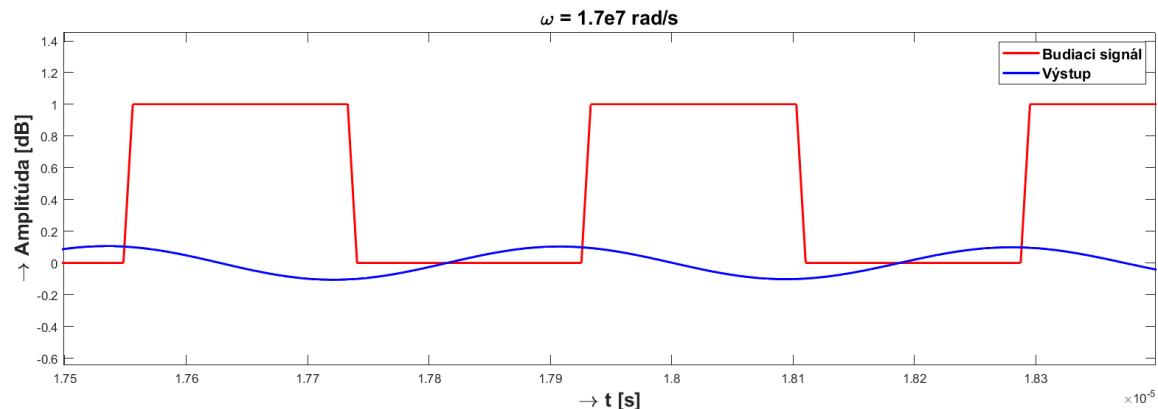


Obr. 6.9 Rozdiel signálov pri frekvencii  $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$

### 6.3 Odozva na obdĺžnikový signál

V tejto úlohe budeme simulať odozvu nášho systému na digitálny obdĺžnikový signál s hodnotami 0 a 1. Frekvencie vstupných signálov preberieme z úlohy odozvy na harmonický signál. Z Obr.6.9-11 vidíme, že výstupný signál má podobný charakter ako pri odpovedi na vstupný harmonický signál, súlad medzi hodnotami amplitúd výstupných signálov a fázovým posunom s LFCh je zachovaný.

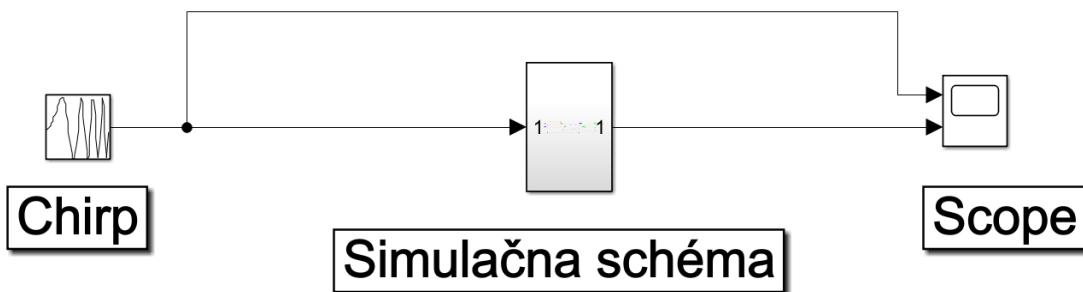
Obr. 6.10 Odozva na obdlžníkový signál  $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$ Obr. 6.11 Odozva na obdlžníkový signál  $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$ Obr. 6.12 Odozva na obdlžníkový signál  $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$



Obr. 6.13 Odozva na obdĺžnikový signál  $\omega = 1.7\text{e}7 \text{ rad/s}$

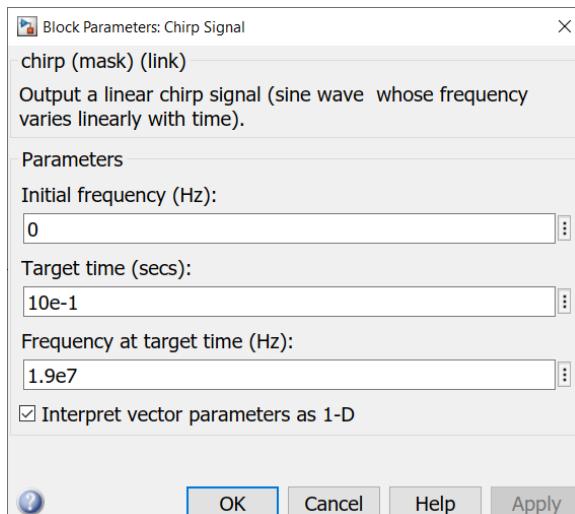
## 7 Odozva obvodu na harmonický signál s narastajúcou frekvenciou (chirp)

Odozva systému na harmonický signál so zvyšujúcou sa frekvenciou by mala odrážať vlastnosti LFCh. V dvoch prípadoch máme správu so zvyšujúcou sa frekvenciou. Na túto úlohu použijeme schému v Simulinku, ktorá zobrazuje nás systém. Na vstup simulačnej schémy pripojíme blok *Chirp*, na zobrazenie výsledku použijeme blok *Scope*. Aktuálny signál *Chirp* a odozva systému na tento signál sa zobrazia v bloku *Scope* (Obr.1).

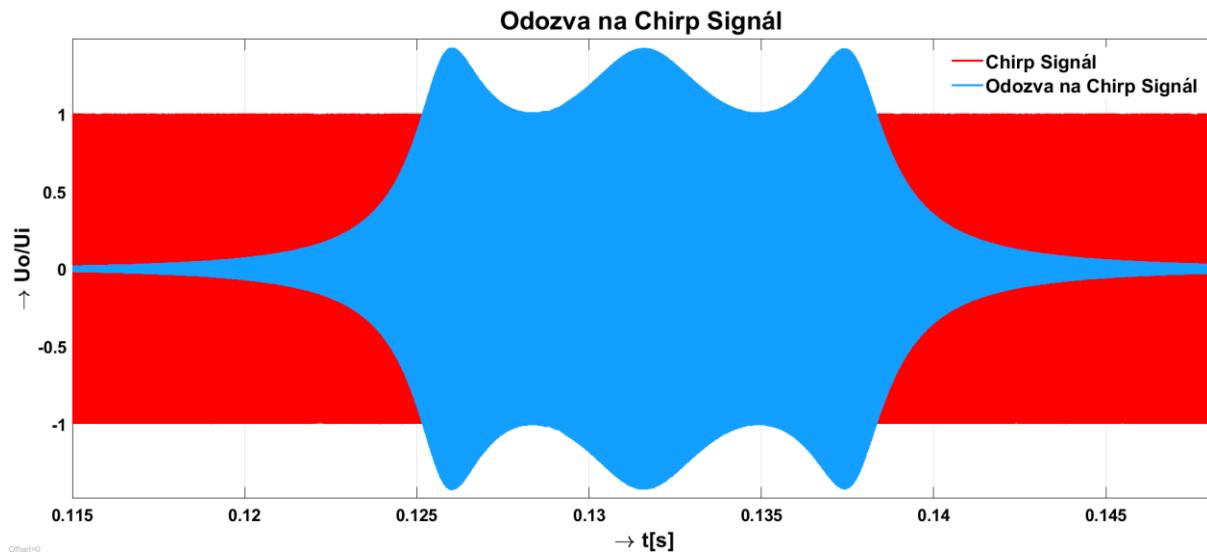


Obr. 7.1 Schéma v Simulink pre odozvu na *Chirp* signál

Blok *Chirp* generuje jeden harmonický signál, ktorého frekvencia sa mení podľa nastavení tohto bloku. Je dôležité zvoliť správne nastavenia pre *Chirp* blok, aby sme dosiahli požadovaný výsledok (Obr.7.2).



Obr. 7.2 Nastavenie v bloku Chirp Signal

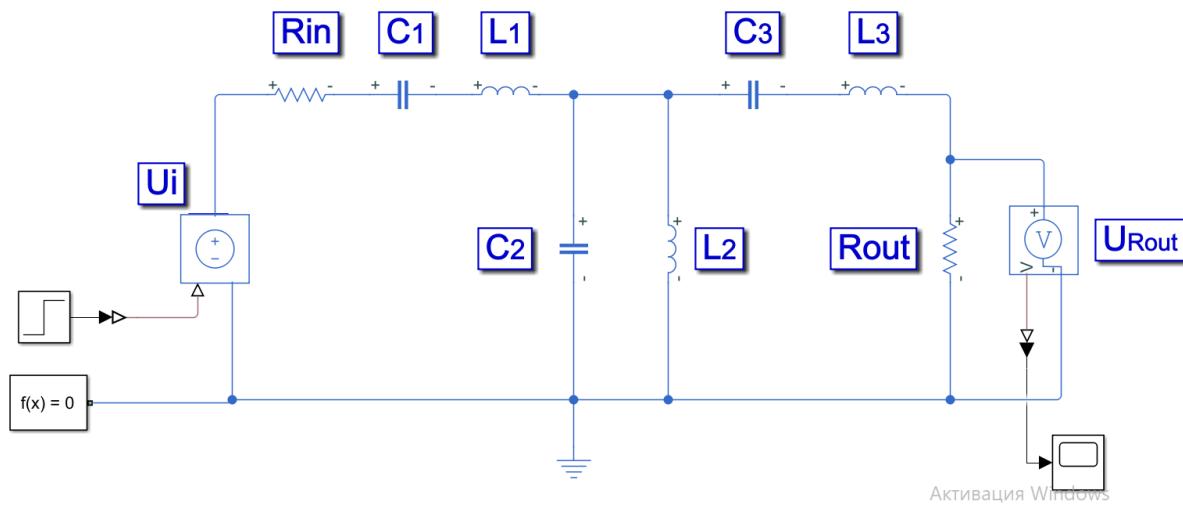


Obr. 7.3 Odozva na Chirp Signál

Obr.7.3 zobrazuje odozvu nášho systému na harmonický signál so zvyšujúcou sa frekvenciou. Charakteristika odozvy je podobná, ako pri LFCh, existuje časový interval, kedy je amplitúda výstupného signálu väčšia alebo rovná vstupnému signálu, odozva na chirp signál má charakter prieplustného pásma. Zvlnenie v prieplustnom pásme je rovnaké ako v LFCh, charakteristické pre Čebyševov filter.

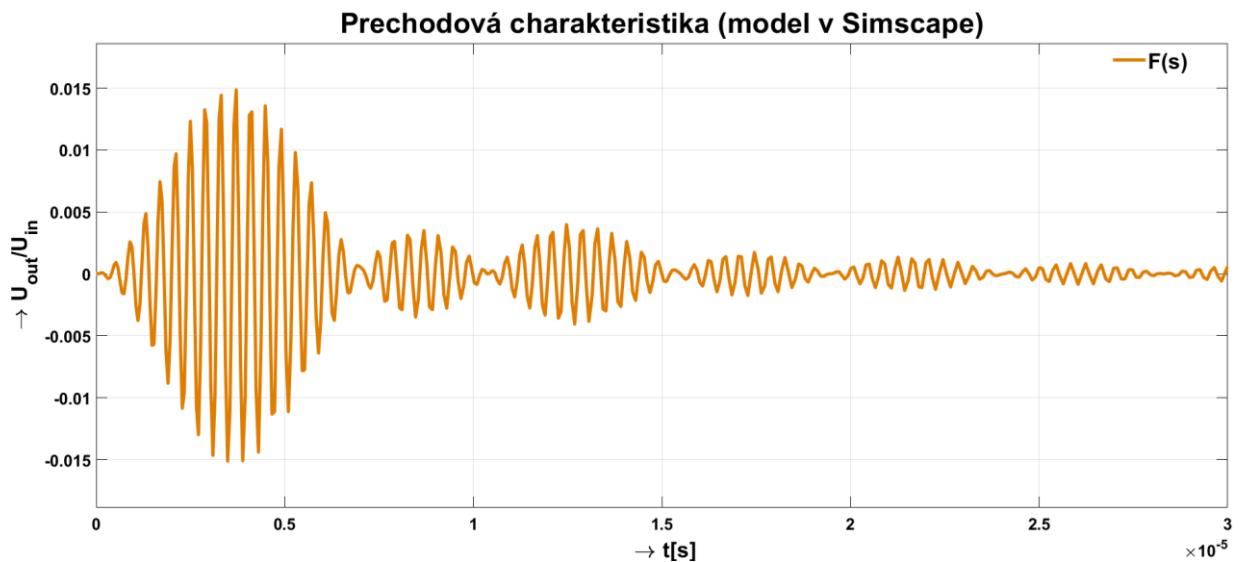
## 8 Model v Simscape

Vytvorme si model nášho elektrického obvodu v programe Simscape. Na rozdiel od Simulink, v Simscape môžeme vytvoriť presnejší model so skutočnými elektrickými prvkami, čo znamená analýzu fyzikálnych vlastností nášho systému. Každý prvok v Simscape má svoje vlastnosti ktoré určené podľa zodpovedajucoho skutočného objektu. Na grafoch, teda môžeme sledovať, ako sa bude správať jeho fyzikálny model, a nie matematický.



Obr. 8.1 Elektrický obvod systemu v Simscape

Ako môžete vidieť z Obr8..1, model v Simscape pozostáva z prvkov elektrického obvodu s príslušnými hodnotami, zdroja napäcia a voltmetra, ktorý bude merať napätie na odpore  $R_L$ . Vidíme aj prevodníky zo Simulinku do Simscape a naopak. Sú potrebné na to, aby sme mohli jednoduchšie zostaviť vstupný signál v digitálnej forme a aby sme zbierali údaje z voltmetra a na základe nich zostavili charakteristiku. V skutočnosti sa takéto prvky dajú porovnať s prevodníkmi AD a DA.

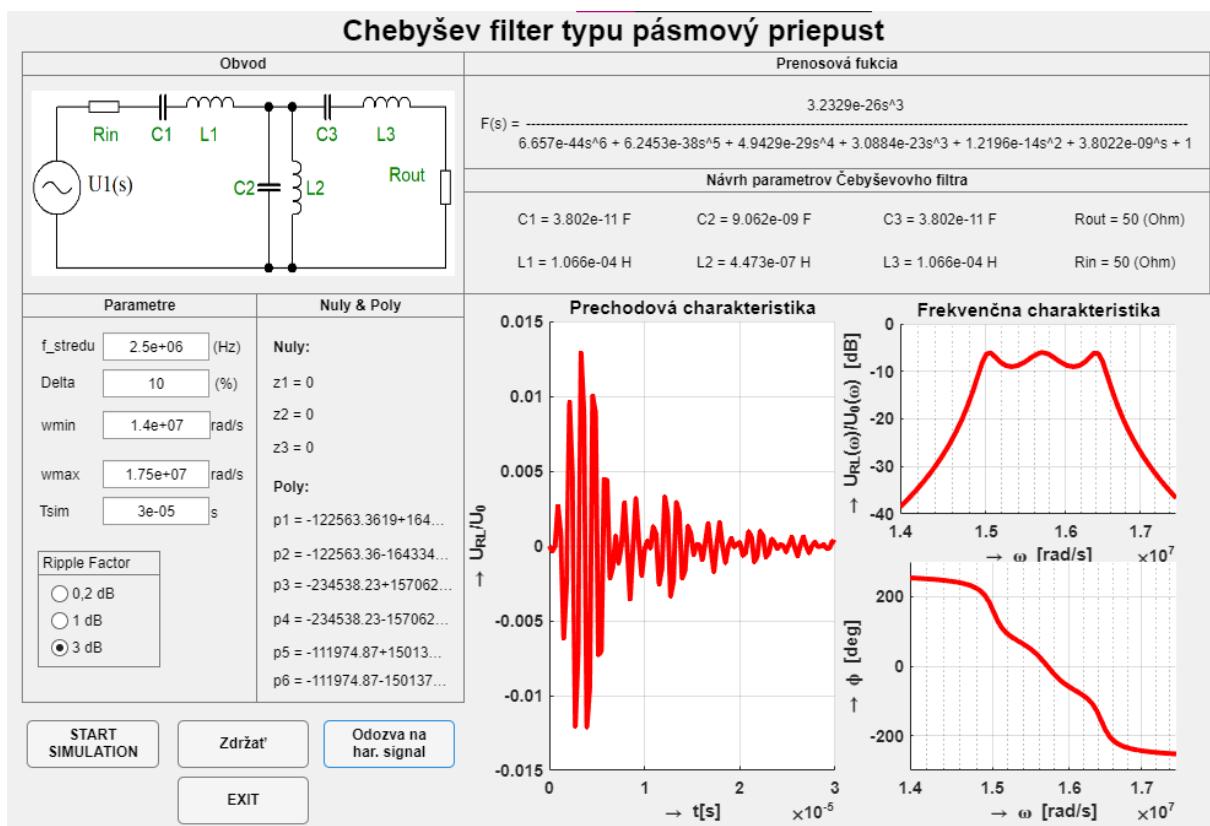


Obr. 8.2 PrCh z modelu v Simscape

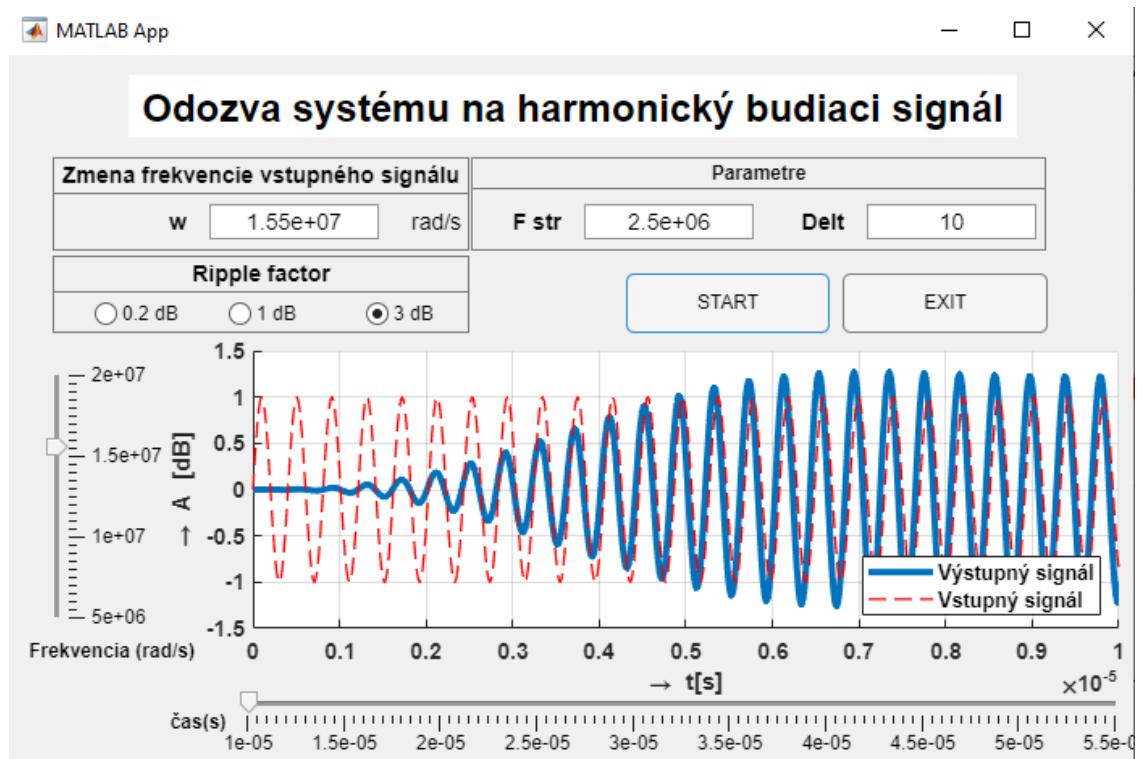
Priebehy modelu v Simscape majú taký istý tvar, ako všetky priebehy ktoré sme pozorovali v predchádzajúcich kapitolách. To znamená, že naša matematická model je vhodná pre analýzu fyzických vlastností kvôli podobnosti z fyzikálnej modely.

## 9 Grafický používateľský interfejs (GUI)

V tejto kapitole budeme sa zaoberať navrhom GUI (Graphical User Interface) podľa nášho systému v MATLABe pomocou vývojoho prostriedku AppDesigner [9][10]. Nás program bude obsahovať ak pasívne prvky, ktoré sú statické tak aj aktívne prvky, ktoré vieme zmeniť, aj s tým zmeniť celý systém prostredníctvom napríklad parametrov systému. Pomocou nášho grafického interfejsu, môžeme jednoduchšie a efektívnejšie analyzovať a experimentovať nad našim systémom. Jednoduchosť spočíva v tom, že používateľ ne potrebuje doberať sa do kódu, ktorým modelujeme náš systém a môže priamo v grafickom prostredí pozorovať vplyv jednotlivých parametrov a graphy, ktoré predstavujú odozvu systému. Kod programu GUI v prílohe B.



Obr. 9.1 Grafické rozhranie systému



Obr. 9.2 Graph odozvy systému na harmonický budiaci signál

## Záver

Pri analýze elektrického obvodu, ktorí sme dostali, zistili, že naša práca bude venovaná filtro Čebyševa typu 1. pásmový prieplust. Z pomocných zdrojov informácií parametre elektrického obvodu boli navrhnuté podľa požiadovaných vlastností filtra: zvlnenie v pásmе prieplustu, frekvencia stredu, šírka pásma prieplustu.

Bol vytvorený matematický model systému. Pomocou poznatkov z kurzu matematickej analýzy I a II Kirchhoffových zákonov sme našli prenosové funkcie nášho systému. Pomocou MATLABu tieto funkcie boli nájdené v symbolickom a numerickom tvare. Po vykreslení grafov prenosových funkcií sme dospeli k záveru, že nás systém je navrhnuté správne a splňa naše požiadavky. Taktiež boli skúmane zmeny v systéme, ktoré nastali pri zmene každého z jeho parametrov. Pre identifikáciu týchto zmien boli vytvorené charakteristiky PrCh a LFCh systému v MATLABe.

Ďalším krokom bolo vytvorenie simulačného modelu pomocou programu Simulink. Tento model dáva lepší vzhľad na súvis medzi jednotlivými parametrami obvodu. Po zostavení modelu boli grafy totožné, čo naznačovalo správnosť nášho riešenia. Bol odvodený stavový model systému, ktorý reprezentoval informáciu o vnútorných premenných systému. Čo je presnejší model nášho SISO systému.

Jednou z úloh bolo overiť odozvu systému na harmonický budiaci signál. Na tento účel sme priviedli signál s určitou frekvenciou na vstup a skúmali, ako sa zmení výstupný signál, lepšie porozumieť o, čo ide v LFCh.

Dalej sme sa zoznámili s programom Simscape, zvážili jeho výhody oproti Simulinku a výsledkom bolo vytvorenie modelu filtra v Simscape a vykreslovanie grafov fyzických procesov prebiehajúcich v našom systéme.

Jednou z najdôležitejších častí práce bolo vybudovať rozhranie, ktoré by bolo zrozumiteľné pre bežných používateľov. Na tento účel sme vytvorili rozhranie GUI v programe AppDesigner. To zjednodušilo vizuálnu časť nášho projektu a sprístupnilo ho bežným používateľom.

Stručne povedané, v tomto projekte sme sa naučili simulovaliť elektrické systémy. Upevnili sme si znalosti z práce v MATLABe a osvojili si aj nové programy, pomocou ktorých sme simulovali nás systém. Zvládli sme tiež rôzne simulačné metódy, analyzovali sme kladne a záporne stránky každého z nich a nakreslili sme každú metódu pre názornejšiu demonštráciu.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Design of 0.5 dB equal ripple band pass filter <https://www.youtube.com/watch?v=zFTwKzQFd3Q>, [online: April 2023]
- [2] Butterworth and Chebyshev Filters <https://inlnk.ru/XOB330>, [online: April 2023]
- [3] Fedák, V.: Modelovanie elektromechanických sústav. Prednášky, ZS 2022/23. KEM FEI TU v Košiciach.
- [4] Fedák, V.: Modelovanie elektromechanických sústav. Technická univerzita v Košiciach. Košice 2015. ISBN: 978-80-553-2111-0.
- [5] Circuit analysis | Electrical engineering | Science | Khan Academy <https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic>, [online: April 2023].
- [6] Node Voltage Method Circuit Analysis With Current Sources <https://www.youtube.com/watch?v=BMnFC63m1fQ&t=372s>, [online: April 2023].
- [7] Mesh Current Problems - Electronics & Circuit Analysis <https://www.youtube.com/watch?v=k5Tlg27JDtc&t=174s> [online: April 2023].
- [8] Control Systems Lecture 21 Exercise 127: State-space model of an electric circuit <https://www.youtube.com/watch?v=sL0LtyfNYkM> [online: April 2023].
- [9] How to Make an Interactive App in MATLAB, <https://www.youtube.com/watch?v=SpAp7QACF34>, [online: April 2023].
- [10] UIAxes Properties, <https://nl.mathworks.com/help/matlab/ref/matlab.ui.control.uiaxes-properties.html>, [online: April 2023].

## Prílohy

**Príloha A: MSE.m**(program pre výpočet prenosov, kreslenie charakteristík, a pod).

```
% Program pre výpočet TF a SS pomocou symb.MATLABu. Holysh-Chernozub
% Simulácia a znázornenie PrCh a LFCh
% Príklad: Chebyševov filter typ 1
clc, clear, clf, format compact
syms s Rs Rl L1 L2 L3 C1 C2 Ur Ui

%% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Filter Chebysheva typu pásmový prieplust')
g1=3.3487; g2=0.7117; g3=g1; del=0.10; f0=2.5e6;
Rsx=50; Rlx=50; Rx=50;
L1x=(g1*Rx)/(2*pi*f0*del); L2x=(Rx*del)/(g2*2*pi*f0); L3x=(g3*Rx)/(2*pi*f0*del);
C1x=del/(g1*Rx*2*pi*f0); C2x = g2/(Rx*2*pi*f0*del);
C3x=del/(g3*Rx*2*pi*f0); % parametre obvodu
Ui=1;
Tstep=3e-5; wmin=1.4e7; wmax=1.75e7 % parametre pre Step a Bode
color='b'; % farba grafu

%% MSP
disp('MSP')
% Zápis systému a výpočet TF v symbolickom tvare
Ze=(L2*s)/(1+L2*C2*s^2);
Z=[Ze+Rs+1/(s*C1)+L1*s -Ze; -Ze Ze+Rl+1/(s*C3)+s*L3] % matica impedancií obvodu
u=[Ui;0] % vektor napäti obvodu (i=input)
ZI2=[Z(:,1) u ] % submatica pre I2, pre I1 by to bolo: ZI1=[u Z(:,2)]
I2=det(ZI2)/det(Z) % výpočet slučkového prúdu I2 Cramerovým pravidlom
Ur=Rl*I2 % výstupné napätie na R2 (Ohmov zákon), (o - output)
F=Ur/Ui % TF F(s) = Uo(s)/Ui(s) v symbolickom tvare
F=collect(F)
pretty(F)
% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F) % oddelenie polynómov čitateľa a menovateľa
cit=subs(cit,{Rl,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{Rlx,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); % dosadenie
hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{Rl,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{Rlx,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); % dosadenie do
polynómu menovateľa
b=sym2poly(cit) % b - koeficienty polynómu čitateľa b(s)
a=sym2poly(men) % a - koeficienty polynómu menovateľa a(s)
b=double(b) % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a)
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end))% TF upravená pre a0=1 (normovanie TF)
%{
%% Vykreslovanie a popis priebehov PrCh a LFCh
figure(1)

subplot(121);
step(F,Tstep), grid on,
title('Prechodová charakteristika','FontSize',20,'FontWeight','bold')
legend('F','Orientation','vertical','FontAngle',
'italic','FontSize',16,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow t','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow U_R/U_{in}','FontSize',16,'FontWeight','bold')
%LFCh
subplot(122); bode(F,{wmin,wmax}), grid on
title('Frekvenčná charakteristika','fontsize',20,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16,'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)

% Vypočet nulov a polov systému
```

```

z1=zero(F)
p1=pole(F)

%% Odozva har. signal
F=F*3;
figure(2)
bode(F,{wmin,wmax}), grid on
title('Frekvenčná charakteristika','fontsize',20,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16,'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)
n=50;
figure(3)
legend('F(s)','Orientation','horizontal','FontAngle', 'italic','FontSize',16)
w1=1.45e7; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % volba frekv, doba periody, doba kon.
[u1,t1]=gensig('sine',T1,Tkon1,T1/24); %('sine','square' doba periódy, trvanie signálu,
lsim (F,u1,t1),grid on % formatovanie nadpisu grafu fonty: vypis hondoty
frekvencie do nadpisu, použite skratiek \it italics, \rm normal, \bf bold
xlim([0,Tkon1]);
title ('\omega = 10 rad/s');
ylabel('\rightarrow Amplitúda [dB]'), xlabel('\rightarrow t [s]');

figure(4)
w1=1.53e7; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % volba frekv, doba periody, doba kon.
[u1,t1]=gensig('sine',T1,Tkon1,T1/24); % doba periódy, trvanie signálu, vzorkovanie
lsim (F,u1,t1),grid on % formatovanie nadpisu grafu fonty: vypis hondoty
frekvencie do nadpisu, použite skratiek \it italics, \rm normal, \bf bold
xlim([0,Tkon1]);
title ('\omega = 45 rad/s');
ylabel('\rightarrow Amplitúda [dB]'), xlabel('\rightarrow t [s]');

figure(5)
w1=1.57e7; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % volba frekv, doba periody, doba kon.
[u1,t1]=gensig('sine',T1,Tkon1,T1/24); % doba periódy, trvanie signálu, vzorkovanie
lsim (F,u1,t1),grid on % formatovanie nadpisu grafu fonty: vypis hondoty
frekvencie do nadpisu, použite skratiek \it italics, \rm normal, \bf bold
xlim([0,Tkon1]);
title ('\omega = 667 rad/s');
ylabel('\rightarrow Amplitúda [dB]'), xlabel('\rightarrow t [s]');

%% State Space
clear
syms s Rs Rl L1 L2 L3 C3 C1 C2 Ur Ui
disp('Stavový model v symbolickom tvare:')

A=[-Rs/L1 0 0 -1/L1 -1/L1 0
    0 0 0 1/L2 0
    0 0 -Rl/L3 0 1/L3 -1/L3
    1/C1 0 0 0 0 0
    1/C2 -1/C2 -1/C2 0 0 0
    0 0 1/C3 0 0 0]
b=[1/L1; 0; 0; 0; 0; 0]
cT=[0 0 Rl 0 0 0]
d=[0]

disp('parametre obvodu:');
g1=3.3487; g2=0.7117; g3=g1; del=0.10; f0=2.5e6;
Rx=50; Rlx=50; Rx=50;
%L1x=35.47e-3; C1x=1.428e-6; L2x = 1.432; C2x = 35.38e-9; C3x=3.010e-6; L3x = 16.83e-3;
L1x=(g1*Rx)/(2*pi*f0*del); L2x=(Rx*del)/(g2*2*pi*f0); L3x=(g3*Rx)/(2*pi*f0*del);
C1x=del/(g1*Rx*2*pi*f0); C2x = g2/(Rx*2*pi*f0*del); C3x=del/(g3*Rx*2*pi*f0); % parametre
obvodu
Ui=1;
Tstep=3e-5; wmin=1.4e7; wmax=1.75e7; % parametre pre Step a Bode
color='r'; % farba grafu

```

```

Rs=Rsx; Rl=Rlx; L1=L1x; L2=L2x; L3=L3x; C1=C1x; C2=C2x; C3=C3x;

disp('Stavový po dosadení hodnôt parametrov:')
A=[-Rs/L1 0 0 -1/L1 -1/L1 0
   0 0 0 1/L2 0
   0 0 -Rl/L3 0 1/L3 -1/L3
   1/C1 0 0 0 0 0
   1/C2 -1/C2 -1/C2 0 0 0
   0 0 1/C3 0 0 0]
b=[1/L1; 0; 0; 0; 0; 0]
cT=[0 0 Rl 0 0 0]
d=[0]

sys = ss(A,b,cT,d);

disp('Výpis stavového modelu:')
printsys(A,b,cT,d);

disp('Výpis prenosovej funkcie:')
[nums,dens]=ss2tf(A,b,cT,d)
Fss=tf(nums/dens(end),dens/dens(end))

disp('Vlastné hodnoty matice A:')
eig(A)

disp('Póly prenosovej funkcie Fss:')
p=pole(Fss)

format short

figure(6)
subplot(121);
step(sys,Tstep,color), grid on,
title('Prechodová charakteristika (State Space)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold')
legend('Fss(s)', 'Orientation', 'vertical', 'FontAngle',
'italic', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold')
xlabel('\rightarrow t', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('\rightarrow U_R/U_{in}', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold')
%LFCh
subplot(122); bode(sys,{wmin,wmax},color), grid on
title('Frekvenčná charakteristika (State Space)', 'fontSize', 20, 'FontWeight', 'bold')
xlabel('\rightarrow Frequency', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('\rightarrow \phi', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold')
set(findall(gcf,'type','line'), 'linewidth', 2)

```

### Príloha B: MUN.m (program pre výpočet prenosov metodou uzloveho napatia).

```

clc, clear, clf, format compact
syms s Rs Rl L1 L2 L3 C3 C1 C2 Ur Ui

%% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Filter Chebysheva typu pásmový prieplust')
g1=3.3487; g2=0.7117; g3=g1; del=0.10; f0=2.5e6;
Rsx=50; Rlx=50; Rx=50;
L1x=(g1*Rx)/(2*pi*f0*del); L2x=(Rx*del)/(g2*2*pi*f0); L3x=(g3*Rx)/(2*pi*f0*del);
C1x=del/(g1*Rx*2*pi*f0); C2x = g2/(Rx*2*pi*f0*del); C3x=del/(g3*Rx*2*pi*f0); %
parametre obvodu
Ui=1;
Tstep=3e-5; wmin=1.4e7; wmax=1.75e7    % parametre pre Step a Bode
color='b'; % farba grafu

%% MUN

```

```

disp('MUN')
% Zápis systému a výpočet TF v symbolickom tvare

Ze=(L2*s)/(1+L2*C2*s^2); %Ekvivalentny odpor paralelnego zapojenia C2 a L2
Z1=(s*Rs*C1+L1*C1*s^2+1)/(s*C1); %Ekvivalentny vetvy z odporami Rs C1 a L1
Z3=(s*Rl*C3+L3*C3*s^2+1)/(s*C3); %Ekvivalentny vetvy z odporami Rl C3 a L3
F = (Ze*Rl)/(Ze*Z3+Z1*Z3+Ze*Z1);

F=collect(F)
pretty(F)
% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F) % oddelenie polynómov čitateľa a menovateľa
cit=subs(cit,{Rl,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{Rlx,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); % dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{Rl,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{Rlx,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); % dosadenie do polynómu menovateľa

b=sym2poly(cit) % b - koeficienty polynómu čitateľa b(s)
a=sym2poly(men) % a - koeficienty polynómu menovateľa a(s)
b=double(b) % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a)
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end))% TF upravená pre a[0]=1 (normovanie TF)

subplot(121);
step(F,Tstep), grid on,
title('Prechodová charakteristika MUN','FontSize',20,'FontWeight','bold')
legend('F','Orientation','vertical','FontAngle',
'italic','FontSize',16,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow t','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow U_R/U_{in}','FontSize',16,'FontWeight','bold')
%LFCh
subplot(122); bode(F,{wmin,wmax}), grid on
title('Frekvenčná charakteristika MUN','fontSize',20,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16,'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)

```

**Príloha C: GUI\_Chebyshev\_filter.mlapp** (program pre vytvorenie grafického používateľského rozhrania)

```

app.Labelnum.Text = ' '; % vymaze čitateľ TF
app.Labelden.Text = ' '; % vymaze menovateľ TF
Tsim = app.TsimEditField.Value;
f0 = app.f_streduEditField.Value;
del = app.DeltaEditField.Value;
del = del/100;
g1=3.3487;
g2=0.7117;
g3=3.3487;
R=50;
L1 = (g1*R)/(2*pi*f0*del);
L2 = (R*del)/(g2*2*pi*f0);
L3 = (g3*R)/(2*pi*f0*del);
C1 = del/(g1*R*2*pi*f0);

```

```

C2 = g2/(R*2*pi*f0*del);
C3 = del/(g3*R*2*pi*f0);
num = [C1*C3*L2*R 0 0 0]
den = [C1*C2*C3*L1*L2*L3 C1*C2*C3*L1*L2*R+C1*C2*C3*L2*L3*R
C1*C2*L1*L2+C1*C3*L1*L2+C1*C3*L1*L3+C1*C3*L2*L3+C2*C3*L2*L3+C1*C2*C3*L2*R*R
C1*C3*L1*R+C1*C3*L2*R+C2*C3*L2*R+C1*C2*L2*R+C1*C3*L2*R+C1*C3*L3*R
C1*L1+C1*L2+C2*L2+C3*L3+C1*C3*R*R C3*R+C1*R 1]
num=double(num);
den=double(den);
num=num/den(end);
den=den/den(end);
app.Labelnum.Text = [num2str(num(1)), 's^3'];
app.Labelden.Text = [num2str(den(1)), 's^6 + ', num2str(den(2)), 's^5 +
', num2str(den(3)), 's^4 + ', num2str(den(4)), 's^3 + ', num2str(den(5)), 's^2 +
', num2str(den(6)), 's + ', num2str(den(7))];
app.C1Label.Text = ' ';
app.C2Label.Text = ' ';
app.C3Label.Text = ' ';
app.L1Label.Text = ' ';
app.L2Label.Text = ' ';
app.L3Label.Text = ' ';
app.C1Label.Text = sprintf('C1 = %.3e F',C1);
app.C2Label.Text = sprintf('C2 = %.3e F',C2);
app.C3Label.Text = sprintf('C3 = %.3e F',C3);
app.L1Label.Text = sprintf('L1 = %.3e H',L1);
app.L2Label.Text = sprintf('L2 = %.3e H',L2);
app.L3Label.Text = sprintf('L3 = %.3e H',L3);
zeros=zeros(tf(num,den));
poles=pole(tf(num,den));
format shortG
p1=round(poles(1)); p1 = p1/100000;p1=round(p1,3);
p1=num2str(p1); p1=sprintf('p1 = %s e5',p1);
p2=round(poles(2)); p2 = p2/100000; p2=round(p2,3);
p2=num2str(p2); p2=sprintf('p2 = %s e5',p2);
p3=round(poles(3)); p3 = p3/100000;p3=round(p3,3);
p3=num2str(p3); p3=sprintf('p3 = %s e5',p3);
p4=round(poles(4)); p4 = p4/100000;p4=round(p4,3);
p4=num2str(p4); p4=sprintf('p4 = %s e5',p4);
p5=round(poles(5)); p5 = p5/100000;p5=round(p5,3);
p5=num2str(p5); p5=sprintf('p5 = %s e5',p5);
p6=round(poles(6)); p6 = p6/100000;p6=round(p6,3);
n1=round(zeros(1)*100)/100; n1=num2str(n1); n1=sprintf('z1 = %s',n1);
n2=round(zeros(2)*100)/100; n2=num2str(n2); n2=sprintf('z2 = %s',n2);
n3=round(zeros(3)*100)/100; n3=num2str(n3); n3=sprintf('z3 = %s',n3);
G=tf(num,den);
t = linspace(0,Tsim);
plot(app.UIAxes,t,y,"LineWidth",3,'Color','r');
app.UIAxes.XLim = [0 Tsim];
% Graf pre bode
wmin = app.wminEditField.Value;
wmax = app.wmaxEditField.Value;
[mag,phase,wout] = bode(G,{wmin,wmax});
semilogx(app.UIAxes2,wout,20*log10(squeeze(mag)),"LineWidth"

```